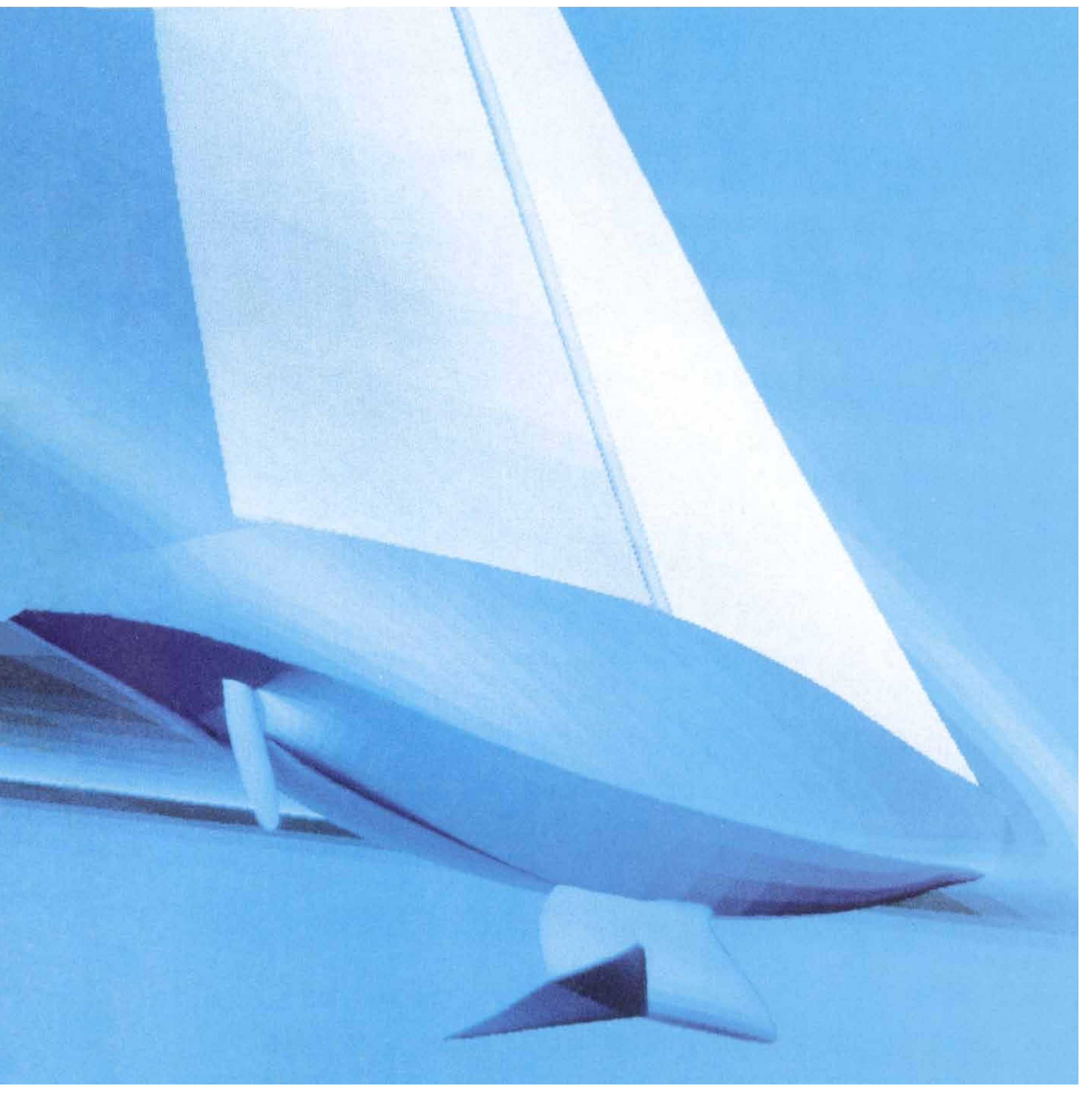
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



STARS & STRIPES: UN YATE POR ORDENADOR

Octubre 1987

450 PTAS.
(IVA INCLUIDO)

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 133
Octubre 1987

INVESTIGACION Y CIENCIA Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCION Carlos Oppenheimer, José María Farré Josa
PRODUCCION César Redondo Zayas
PROMOCION EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S.A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)

SCIENTIFIC AMERICAN

DIRECTOR EDITORIAL Jonathan Piel
REDACCION Armand Schwab, Jr. (Subdirector), Timothy Appenzeller, John M. Benditt, David L. Cooke, Jr., Ari W. Epstein, Gregory R. Greenwell, John Horgan, Robert Kunzig, James T. Rogers, Ricki L. Rusting, Karen Wright
DIRECTOR ARTISTICO Samuel L. Howard
DIRECTOR DE PRODUCCION Richard Sasso
PRESIDENTE HONORARIO Gerard Piel

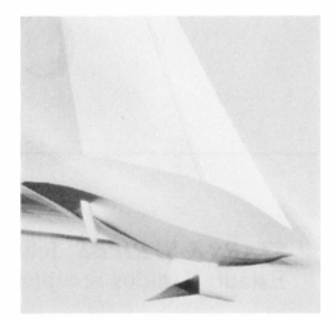
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Laureano Carbonell: *Stars & Stripes*; Ramón Pascual: *Colisiones entre protones con espín*; Ana García García: *Las causas del síndrome de Down*; Esteban Santiago Calvo: *La teoría de la selección clonal*; Amando García Rodríguez: *Transistores de arseniuro de galio*; Antonio Blanco Freijeiro: *Caza de gacelas en la Siria de la edad de Piedra*; Manuel Puigcerver: *Contaminación atmosférica por partículas*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

Antonio Fernández-Rañada, Luis Alonso, Claudio Esteva y Jordi Sabater



PORTADA

En la portada aparece la imagen generada por computador del casco y quilla del *Stars & Stripes*, el yate vencedor de la copa América de 1987 (ver *"Stars & Stripes"*, por John S. Letcher, Jr., John K. Marshall, James C. Oliver III y Nils Salvensen, página 34), como lo vería un observador situado bajo el agua. Todos los elementos representados fueron concebidos como superficies matemáticas usando el programa de proyecto computadorizado Fast Yacht, desarrollado por la Design Systems & Services, Inc. George Hazen, de la Design Systems, creó las superficies representativas del casco, quilla, aletas y timón próximas a la forma final, cuyos pormenores técnicos no se han hecho públicos todavía. Las representaciones de la superficie del agua, velas y arboladura son obra de Christopher Cressy, de la Science Applications International Corporation. El dibujo de conjunto ha sido generado por una Hewlett-Packard 320SRX Graphics Workstation.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números):
4950 pesetas (IVA incluido)
Extranjero:
Un año (12 números): 35 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)
Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
O'Donnell, 18, 4.º J - 28009 Madrid
Teléfonos 275 88 85 - 275 90 85
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.º, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Ilustración de la portada cortesía de Design Systems & Services, Inc.

Página	Fuente	Página	Fuente
9	Design Systems & Services, Inc.	83	Thomas G. Dzubay, Agencia Federal para la Protección del Ambiente
10-12	Hank Iken	84	Thomas C. Moore
13	John K. Marshall	85	Robert W. Shaw (*arriba*), David L. Johnson (*abajo*)
14	Enrico Ferorelli	86-88	Thomas C. Moore
19	Mort Rosen, Laboratorio Nacional de Brookhaven	89	Robert K. Stevens, Agencia Federal para la Protección del Ambiente (*arriba*); Thomas C. Moore (*abajo*)
20-26	Gabor Kiss	93	N. Henriques-Gil, Universidad Complutense, Madrid
29	Frank Varney	94	J. Sánchez Rufas, Instituto de Biología Celular del C.S.I.C.
30	Children's Hospital, Denver	95	M. Ruiz-Rejón, C. Ruiz-Rejón y J. L. Oliver
31-34	Joan Starwood	96	N. Henriques-Gil, J. L. Santos y P. Arana, Universidad Complutense, Madrid
41	James G. Hirsch	97-98	M. Ruiz-Rejón, C. Ruiz-Rejón, J. L. Oliver y Ricardo Génova
42	Royal Society de Londres	99	C. García de la Vega, Univ. Autónoma de Madrid, y J. Sánchez-Rufas, Instituto de Biología Celular del C.S.I.C.
43-46	Dana Burns	100	M. Ruiz-Rejón, C. Ruiz-Rejón, J. L. Oliver y Ricardo Génova
47	Instituto Walter y Eliza Hall de Investigación Médica (*izquierda*); David W. Talmage, Facultad de Medicina de la Universidad de Colorado (*derecha*)	104-105	Michael Goodman
51-53	Andrew Christie	106-107	Edward Bell
54	William R. Frensley, Texas Instruments, Inc.	111	Andreas Kay
67-68	Andrew Christie	112-113	Michael Goodman
69	Bumman Kim, Hua-Quen Tserng y Hung-Dah Shih, Texas Instruments, Inc.		
73	Cortesía de la Biblioteca de la Universidad de Cambridge		
74	Gordon Hillman		
75-79	Patricia J. Wynne		

ISSN 0210-136X — Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por
Reprostudy, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

JOHN S. LETCHER, JR., JOHN K. MARSHALL, JAMES C. OLIVER III y NILS SALVESEN (“*Stars & Stripes*”) son miembros del equipo que proyectó el velero vencedor de la Copa de América. Se dedican también a la vela deportiva. Letcher, que presidió el equipo proyectista, asesora a la Science Applications International Corporation (SAIC), que tiene la sede en Annapolis. Se doctoró en ingeniería aeronática en el Instituto de Tecnología de California y completó su formación en la Universidad de Michigan, aplicándose a la ingeniería naval. Marshall, biólogo de formación, se encargó de coordinar el proyecto, dada su experiencia en esa lid deportiva; trabaja en la empresa privada. A Oliver le correspondió la simulación por ordenador del proyecto y su ensayo en el tanque de pruebas; es ingeniero naval por la Universidad George Washington. Salvesen, arquitecto naval formado en la Universidad de Michigan, coordinó los aspectos técnicos del proyecto, hidrodinámicos sobre todo.

ALAN D. KRISCH (“Colisiones entre protones con espín”) enseña física en la Universidad de Michigan, a la que llegó tras doctorarse por la de Cornell en 1964. El campo de investigación de Krisch se ha centrado en el estudio de las interacciones protón-protón con la vista puesta en el descubrimiento de los componentes del protón. Desde 1972, ha venido trabajando con haces de protones polarizados, primero en el sincrotrón de gradiente cero del Laboratorio Nacional de Argonne y, desde 1979, en el sincrotrón de gradiente alternante instalado en el Laboratorio Nacional de Brookhaven.

DAVID PATTERSON (“Las causas del síndrome de Down”) preside y dirige el Instituto Eleanor Roosevelt para la Investigación del Cáncer, con sede en Denver. Es profesor de los departamentos de ciencias biológicas y medicina en la Universidad de Colorado. Tras recibirse de doctor por la Universidad de Brandeis, en 1971, entró a trabajar en el Instituto Eleanor Roosevelt con un beca de la fundación Damon Runyon-Walter Winchell. Desde 1974 pertenece al claustro docente de la Universidad de Colorado.

GORDON L. ADA y SIR GUSTAV NOSSAL (“La teoría de la selección clonal”) trabajaron juntos durante cinco años en los estudios que contribuyeron a establecer la teoría cuya historia nos narran en este artículo. Ada enseña microbiología en el centro de investigaciones médicas John Curtin, de la Universidad Nacional de Australia. En 1959 se recibió de doctor por la de Sydney. De 1946 a 1948 trabajó en el Instituto londinense de Investigaciones Médicas. Hasta 1968 formó parte del Instituto Walter y Eliza Hall de Investigaciones Médicas de Melbourne, año en que se le contrató para dirigir el departamento de microbiología del John Curtin. Nossal ha sido director del Instituto Walter y Eliza Hall, así como profesor de biología en la Universidad de Melbourne desde 1965. Este último centro le había otorgado el doctorado en 1960, si bien comenzó su carrera universitaria en Sydney. Nossal ha dado clases también en la Universidad de Stanford y en el Instituto Pasteur, además de ser consultor de la Organización Mundial de la Salud. Se le concedió el título de Sir en 1977.

WILLIAM R. FRENSLEY (“Transistores de arseniuro de galio”) trabaja en la empresa Texas Instruments en la sección de conceptos avanzados. Allí se dedica al desarrollo de simulaciones por ordenador de dispositivos de semiconductores mecánico-cuánticos. Comenzó su carrera en el Instituto de Tecnología de California para concluirla con el grado de doctor en la Universidad de Colorado en Boulder.

ANTHONY J. LEGGE y PETER A. ROWLEY-CONWY (“Caza de gacelas en la Siria de la edad de Piedra”) se dedican a la arqueología de campo y estudian la fauna y asentamientos agrícolas del Mediterráneo y Cercano Oriente. Legge es, además, catedrático de arqueología en la Universidad de Londres. Se formó en la Universidad de Cambridge, de donde pasó, contratado como docente, a la de Londres. Rowley-Conwy es colaborador de investigación en el Clare Hall de Cambridge desde 1986. En la Universidad de Cambridge justamente se había doctorado en 1980. De 1982 a 1985 trabajó con Legge en el proyecto aquí descrito de Tell Abu Hureyra.

ROBERT W. SHAW (“Contaminación atmosférica por partículas”) es jefe de diagnóstico químico y ciencia de superficies en la Oficina de Investigación del Ejército de los Estados Unidos en Research Triangle Park. Obtuvo su doctorado en química física en la Universidad de Washington en 1970; de ésta pasó a Princeton y, luego, a la de Oregon. En 1977 ingresó en la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Shaw se ve obligado a estar al día a causa de su hija de tres años, quien ya le ha preguntado por qué tanto los copos de nieve como la leche son blancos.

MANUEL RUIZ REJON, CARMELO RUIZ REJON y JOSE L. OLIVER (“Evolución de los cromosomas *B*”) pertencen al departamento de genética de la Universidad de Granada. En ésta recibieron el título de doctor en ciencias biológicas los dos primeros, quienes llevan varios años investigando las consecuencias genéticas y evolutivas de la variabilidad cromosómica en las plantas. Oliver se doctoró por la Universidad Autónoma de Madrid, de donde fue profesor titular hasta el curso pasado. Ha trabajado en variabilidad enzimática y evolución de genes duplicados en los vegetales. Los tres autores se han centrado en la evolución de los cromosomas *B* en las plantas, tanto en condiciones naturales como *in vitro*.

Hace...

José M.ª López Piñero

...cuatrocientos años

José de Acosta regresó a España, después de permanecer casi dos décadas en América.

Acosta nació a finales de 1539 o comienzos de 1540 en Medina del Campo, en el seno de una familia perteneciente a la entonces próspera burguesía mercantil de dicha ciudad. Su padre, en efecto, era un comerciante, al parecer de origen converso. Cursó sus primeros estudios en la misma Medina, en un colegio de la Compañía de Jesús, en la que entró como novicio a los doce años. A partir de entonces, su formación como jesuita se desarrolló en varias localidades castellanas y portuguesas, culminando con una estancia de siete años en la Universidad de Alcalá. Ordenado en 1566, fue profesor en los colegios de la Compañía de Ocaña y Plasencia, hasta que a mediados de 1572 se trasladó al Perú, formando parte de la tercera misión jesuita enviada a aquel virreinato. Allí permaneció durante dieciocho años, desarrollando una intensa actividad misional, primero como visitador de los colegios de la orden y más tarde como provincial. A mediados de 1586 marchó a Nueva España, donde estuvo un año escaso, regresando a continuación a la metrópoli. Durante el resto de su vida, Acosta residió en Roma y en diversas ciudades españolas. Falleció en 1600, siendo rector del colegio de la Compañía en Salamanca.

Entre 1575 y 1576, Acosta redactó su importante tratado misional *De procuranda Indorum salute* y una especie de prefacio del mismo sobre la naturaleza americana titulado *De natura novi orbis*. Ambos textos fueron impresos juntos en Salamanca el año 1588. El segundo de ellos, traducido al castellano, pasó poco después a convertirse en los dos "libros" iniciales de la *Historia natural y moral de las Indias*, cuya primera edición apareció en Sevilla en 1590.

La obra incluye siete "libros". La "historia natural" ocupa los cuatro primeros y la "historia moral", es decir, "las costumbres y hechos de los indios", los tres últimos. Acosta utilizó para escribirla, no solamente sus propias observaciones de la realidad americana, sino materiales procedentes de textos de otros autores, entre los que destacan Juan de Tovar en lo relativo a México y Juan Polo de Ondegardo y Luis Capoche en lo tocante al Perú. También elogia las investigaciones de Francisco Hernández y recomienda la lectura de los libros de Monardes.

En el "proemio al lector" advierte ya explícitamente que su propósito no es ofrecer una nueva exposición descriptiva: "Del nuevo mundo e Indias Occidentales han escrito muchos autores diversos libros y relaciones, en que dan noticia de las cosas nuevas y extrañas que en aquellas partes se han descubierto (...). Mas hasta ahora no he visto autor que trate de declarar las causas y razón de tales novedades y extrañezas de naturaleza, ni que haga discurso o inquisición en esta parte." Como ha subrayado Barbara G. Beddall, Acosta realizó dicha tarea apoyándose en los supuestos de la filosofía natural aristotélica, pero sin someterse en absoluto a la autoridad de Aristóteles ni de ningún otro clásico. De esta forma, utiliza los hechos aportados por la experiencia para desmentir las doctrinas tradicionales y fundamentar las propias. Sus repetidas críticas a Aristóteles y otras "autoridades" no son meras rectificaciones de detalle, sino que son consecuencia de una postura metodológica mucho más ambiciosa: "Miremos atentamente los principios (de los antiguos) en donde pudo haber yerro y engaño. Primero diremos cuál sea la verdad, según la experiencia nos la ha mostrado; y después probaremos, aunque es negocio muy arduo, a dar la propia razón conforme a buena filosofía."

Por otra parte, Acosta no examina "problemas" aislados al modo de Cárdenas, sino que aspira a dar razón sistemática de las novedades y extrañezas de la naturaleza americana. Se enfrenta primero con "el cielo, temperamento y habitación de aquel orbe" y, a continuación, con "lo que de elementos y mixtos naturales, que son metales, plantas y animales, parece notable en las Indias".

Una de las cuestiones que estudia con especial detenimiento es el conjunto de condiciones climáticas que hacen que la zona tórrida sea habitable. Considera los errores que movieron "a los antiguos a tener por cosa sin duda que la tórrida era inhabitable" y, frente a la idea tradicional de zona abrasada y seca, totalmente falta de agua y vegetación, afirma que "es humedísima y que en esto se engañaron mucho los antiguos" y que "tiene gran abundancia de aguas y pastos, por más que Aristóteles lo niegue". Explica que "no es en exceso caliente, sino moderadamente caliente", porque el calor "se templa con la muchedumbre de lluvias y con la brevedad de los días", por "los vientos frescos" y por otras causas, "especialmente la vecindad del mar océano". Analiza también la acción del calor del sol en el "levantar aguas" y dedica un capítulo de la razón por la que "las tierras altas son más frías", otro de los temas en los que rebate las doctrinas aristotélicas.

La parte más famosa de la obra es la dedicada al origen de los indios americanos y de los animales existentes en el Nuevo Mundo. Acosta descarta la hipótesis de la Atlántida como una "fina fábula" y considera falsa y fundada en "conjeturas muy livianas" la opinión de que los indios proceden de los judíos. Se preocupa de tener en cuenta lo que "los indios suelen contar de su origen" y consagra un capítulo a destacar las dificultades con que tropieza el estudio del tema. Examina cuidadosamente las posibilidades de que hombres y animales hayan llegado a América por el mar, bien navegando, bien "echados de tormenta, contra su voluntad" y, en el caso de los animales, nadando o volando. Concluye que "es más conforme a buena razón pensar que vinieron por tierra", tanto los "primeros pobladores de Indias" como las "bestias y ganados":

"Pensar que los primeros aportaron a Indias por naufragio y tempestad de mar... ofrece una dificultad que me da mucho en qué entender, y es que ya que demos que hayan venido hombres por mar a tierras tan remotas, y que de ellos se han multiplicado las naciones que vemos; pero las bestias y alimañas, que cría en nuevo orbe muchas y grandes, no sé cómo nos demos maña a embarcarlas y llevarlas por mar a las Indias...

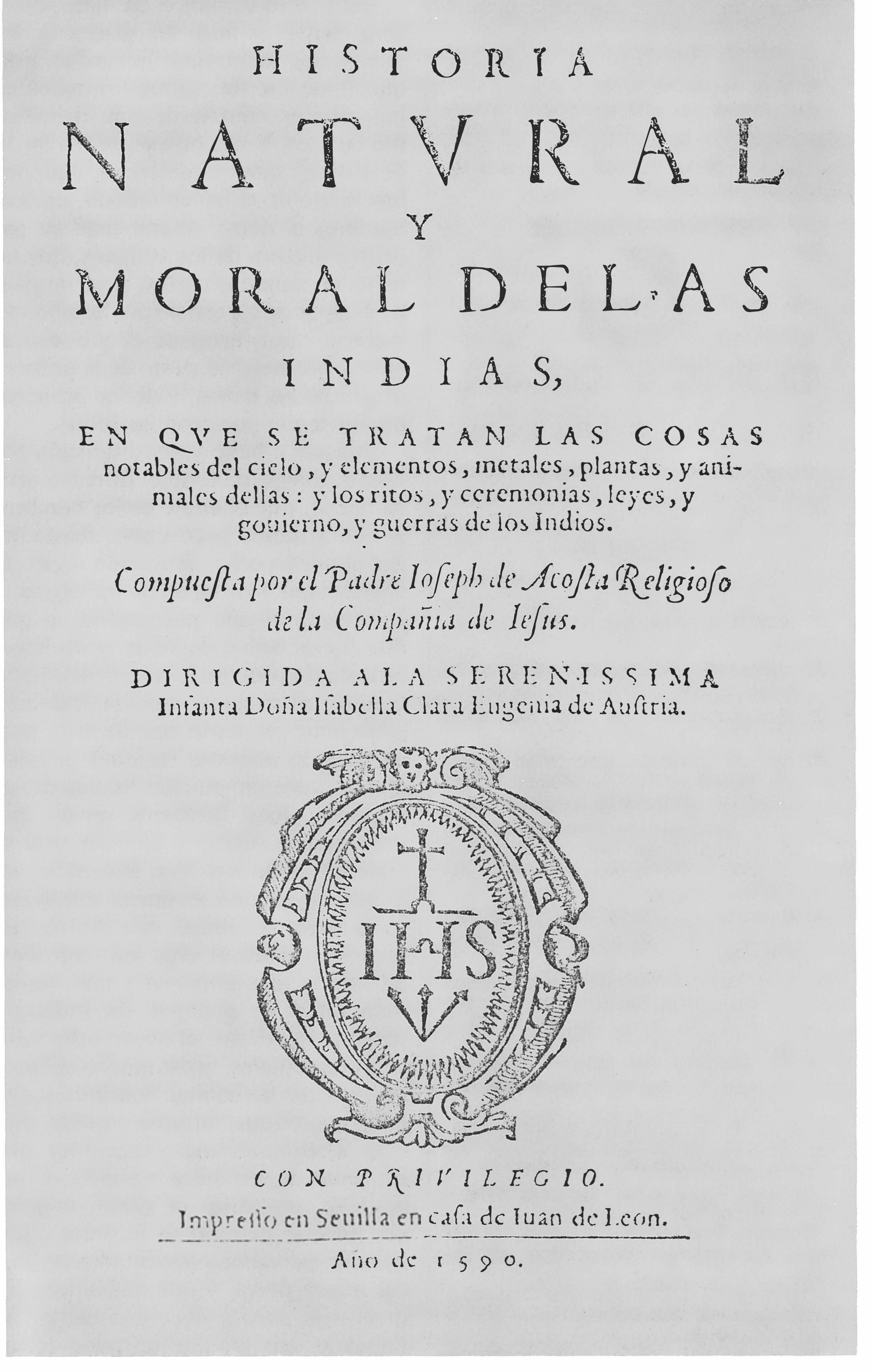
"Que hayan pasado algunos animales de aquellos por pretensión de tener caza, que era otra respuesta, no lo tengo por cosa increíble, pues vemos mil veces que para sola grandeza suelen príncipes y señores tener en sus jaulas leones, osos y otras fieras, mayormente cuando se han traído de tierras muy lejos. Pero esto creerlo de lobos y de zorras, y de otros animales bajos y sin

provecho, que no tienen cosa notable, sino sólo hacer mal a los ganados, y decir que para caza se trajeron por mar, por cierto es cosa muy sin razón. ¿Quién se podrá persuadir, que con navegación tan infinita, hubo hombres, que pusieron diligencia en llevar al Perú zorras, mayormente las que llaman *añas*, que es un linaje el más sucio y hediondo de cuantos he visto? ¿Quién dirá que trajeron leones y tigres? Harto es, y aun demasiado, que pudiesen escapar los hombres con las vidas en tan prolijo viaje, viniendo con tormenta, como hemos dicho, cuanto más tratar de llevar zorras y lobos, y mantenerlos por mar. Cierto es cosa de burla aun imaginarlo.

"Pues si vinieron por mar estos animales, sólo resta, que hayan pasado a nado. Esto ser cosa posible y hacedera, cuanto a algunas islas que distan poco de otras, o de la tierra firme, no se puede negar la experiencia cierta, con que vemos, que por alguna grave necesidad a veces nadan estos animales días y noches enteras, y al cabo escapan nadando; pero esto se entiende en golfillos pequeños. Porque nuestro océano haría burla de semejantes nadadores, pues aún a las aves de gran vuelo les faltan las alas para pasar tan gran abismo. Bien se hallan pájaros, que vuelen más de cien leguas, como los hemos visto navegando diversas veces; pero pasar todo el mar océano volando es imposible, o a lo menos muy difícil. Siendo así todo lo dicho, ¿por dónde abriremos camino para pasar fieras y pájaros a las Indias?, ¿de qué manera pudieron ir del un mundo al otro?

"Este discurso que he dicho, es para mí una gran conjetura para pensar que el nuevo orbe, que llamamos Indias, no está del todo diviso y apartado del otro orbe. Y por decir mi opinión, tengo para mí días ha, que la una tierra y la otra en alguna parte se juntan, y continúan, o a lo menos se avecinan y allegan mucho. Hasta ahora, a lo menos no hay certidumbre de lo contrario. Porque el polo ártico, que llaman norte, no está descubierto y sabida toda la longitud de la tierra; y no faltan muchos que afirmen, que sobre la Florida corre la tierra larguísimamente al septentrión, la cual dicen que llega hasta el mar Scítico, o hasta el Germánico. Otros añaden que ha habido nave que, navegando por allí, relató haber visto los Bacallaos correr hasta los fines cuasi de Europa. Pues ya sobre el cabo Mendocino en la mar del sur, tampoco se sabe hasta dónde corre la tierra, mas de que todos dicen que es cosa inmensa lo que corre. Volviendo al otro polo del sur, no hay hombre que sepa dónde para la tierra, que está de la otra banda del Estrecho de Magallanes. Una nao del Obispo de Plasencia, que subió del Estrecho, refirió que siempre había visto tierra, y lo mismo contaba Hernando Lamero, piloto, que por tormenta pasó dos o tres grados arriba del estrecho. Así que ni hay razón en contrario, ni experiencia que deshaga mi imaginación, u opinión, de que toda la tierra se junta, y continúa en alguna parte, a lo menos se allega mucho.

"Si esto es verdad, como en efecto me lo parece, fácil respuesta tiene la duda tan difícil que habíamos propuesto: cómo pasaron a las Indias los primeros pobladores de ellas, no tanto navegando por mar, como caminando por tierra; y ese camino lo hicieron muy sin pensar, mudando sitios y tierras poco a poco; y unos poblando las ya halladas, otros buscando, vinieron por discurso de tiempo a henchir las tierras de Indias de tantas naciones y gentes y lenguas...


HISTORIA
NATVRAL
Y
MORAL DE LAS
INDIAS,
EN QVE SE TRATAN LAS COSAS notables del cielo, y elementos, metales, plantas, y animales dellas: y los ritos, y ceremonias, leyes, y gouierno, y guerras de los Indios.

Compuesta por el Padre Ioseph de Acosta Religioso de la Compañia de Iesus.

DIRIGIDA A LA SERENISSIMA Infanta Doña Isabella Clara Eugenia de Austria.

CON PRIVILEGIO.

Impresso en Seuilla en casa de Iuan de Leon.

Año de 1590.

Portada de la primera edición de la Historia Natural y Moral de las Indias *(1590), de José de Acosta*

"Pero cosa es mejor de hacer desechar lo que es falso del origen de los indios, que determinar la verdad, porque ni hay escritura entre los indios, ni memoriales ciertos de sus primeros fundadores. Y por otra parte, en los libros de los que usaron letras, tampoco hay rastro de el nuevo mundo, pues ni hombres ni tierra, ni aun cielo les pareció a muchos de los antiguos, que no había en aquestas partes; y así no puede escapar de ser tenido por hombre temerario y muy arrojado el que se atreviere a prometer lo cierto de la primera origen de los indios, y de los primeros hombres que poblaron las Indias.

"Mas así a bulto y por discreción podemos colegir de todo el discurso arriba hecho, que el linaje de los hombres se vino pasando poco a poco, hasta llegar al nuevo orbe, ayudando a esto la continuidad o vecindad de las tierras, y a tiempos alguna navegación, y que éste fue el orden de venir, y no hacer armada de propósito, ni suceder algún grande naufragio: aunque también pudo haber en parte algo de esto; porque siendo aquestas regiones larguísimas, y habiendo en ellas innumerables naciones, bien podemos creer, que unos de una suerte, y otros de otra se vinieron en fin a poblar. Mas al fin, en lo que me resumo, es que el continuarse la tierra de Indias con esotras del mundo, a lo menos estar muy cercanas, ha sido la más principal y más verdadera razón de poblarse las Indias; y tengo para mí, que el nuevo orbe e Indias occidentales, no ha mucho millares de años que las habitan hombres, y que los primeros que entraron en ellas, más eran hombres salvajes y cazadores, que no gente de república y pulida; y que aquéllos aportaron al nuevo mundo, por haberse perdido de su tierra o por hallarse estrechos y necesitados de buscar nueva tierra, y que hallándola comenzaron poco a poco a poblarla, no teniendo más ley que un poco de luz natural, y esa muy escurecida, y cuando mucho algunas costumbres que les quedaron de su patria primera.

"Aunque no es cosa increíble de pensar, que aunque hubiesen salido de tierras de policía, y bien gobernadas, se les olvidase todo con el largo tiempo, y poco uso; pues es notorio que aún en España y en Italia se hallan manadas de hombres, que si no es el gesto y figura, no tienen otra cosa de hombres. Así que por este camino vino a haber una barbariedad infinita en el nuevo mundo."

La distribución geográfica de los animales y las plantas es otro tema de gran relieve en la obra de Acosta. Distingue tres grandes grupos en los seres vivos existentes en el Nuevo Mundo: los "que han sido llevados por españoles, los hay en Indias de la misma especie que en Europa" y los "propios de Indias". El último grupo es, naturalmente, el que le plantea mayores problemas. En el capítulo titulado "Cómo sea posible haber en Indias animales que no hay en otra parte del mundo", afirma que "es cuestión que me ha tenido perplejo mucho tiempo". Analiza muy seriamente las diferencias entre las especies americanas y las europeas y advierte que "quien por vía de poner sólo diferencias accidentales pretendiere salvar la propagación de los animales de Indias y reducirlos a las (especies) de Europa, tomará carga que mal podría salir con ella". Se ocupa de la gran diversidad de la fauna y la flora de las distintas zonas de América, insistiendo en especial en el contraste entre las del continente y las de las islas. Anota también que algunos animales domésticos llevados por los españoles "se han hecho montaraces y crueles" y "multiplicado en gran abundancia".

Acosta intenta "declarar las causas y razón" de muchas otras cuestiones en las que no podemos detenernos, como las mareas y corrientes marinas, los vientos, la "diversa cuesta de los días" en relación con los meridianos, los volcanes y terremotos, etc. Subrayemos únicamente la extraordinaria difusión e influencia que alcanzó su penetrante exposición de los problemas que planteaba la naturaleza americana. La *Historia natural y moral de las Indias* fue traducida al alemán, francés, holandés, inglés, italiano y latín, alcanzando veinticinco ediciones en países extranjeros hasta finales del siglo XVIII. A mediados de la centuria siguiente, cuando la ciencia contemporánea comenzaba a investigar sobre nuevos supuestos las cuestiones que Acosta había formulado, el propio Alexander von Humboldt reconoció en el primer volumen de *Kosmos* (1845) su decisiva aportación. Dicha aportación ha sido después destacada, no sólo por especialistas, sino incluso por historiadores generales. Recordemos la afirmación de J. H. Elliott en *The Old World and the New, 1492-1650*: "Hasta que no se publicó en español, en 1590, la gran *Historia natural y moral de las Indias*, de José de Acosta, no culminó triunfalmente el proceso de integrar al mundo americano en el contexto general del pensamiento europeo (...) la síntesis de Acosta era la culminación de un siglo de esfuerzo."

Stars & Stripes

En la copa América disputada en 1987, el gran esfuerzo técnico e informático aplicado al diseño de la embarcación aspirante, Stars & Stripes, *resultó decisivo para su victoria*

John S. Letcher, Jr., John K. Marshall, James C. Oliver III y Nils Salvesen

Hasta la edición de 1983 de la copa América, que ganó el yate *Australia II*, en los ambientes náuticos imperaba la idea de que resultaba técnicamente imposible mejorar los yates de regatas de la clase 12 metros. Las marcas de las competiciones celebradas desde 1973 habían hecho creer que el diseño de ese tipo de yates había alcanzado la perfección, por cuyo motivo cabía esperar escasos progresos. Sin embargo, la victoria de *Australia II* en 1983 se debió en gran medida a la introducción de un cambio radical en la forma de la quilla.

El resultado impulsó a Dennis Conner, patrón del *Liberty*, el yate norteamericano perdedor de la copa, y a sus consejeros a analizar las causas que condujeron al éxito australiano y buscar una nueva estrategia para la regata de 1987. Con ese objetivo, y como primera medida, crearon la Sail America Foundation, sindicato destinado a recuperar el trofeo con un yate en cuyo proyecto intervendría lo mejor de la tecnología estadounidense. La Sail America desarrolló un intenso programa de investigación, cuyo fruto, el yate *Stars & Stripes*, reconquistó la copa a principios de este mismo año, tras derrotar al defensor australiano *Kookaburra III* en cuatro pruebas seguidas.

En la regata participaron otros cinco sindicatos de Estados Unidos, así como siete más de Canadá, Francia, Italia, Nueva Zelanda y Gran Bretaña. Por su parte, los australianos presentaron cuatro sindicatos, que armaron siete yates nuevos para la defensa. Movidos por el éxito del *Australia II*, todos los sindicatos pusieron las esperanzas en el diseño por ordenador y en el análisis hidrodinámico. Resultaba evidente que, en esta ocasión, la pugna iba a enfrentar, en grado sin precedente, a los técnicos de los países aspirantes a conquistar la copa tanto como a los tripulantes de los yates que intervendrían en las regatas. El yate que ganara en 1987 debería haberse proyectado con la más alta tecnología de vanguardia, pero perdería también si su tripulación careciera de la pericia exigida.

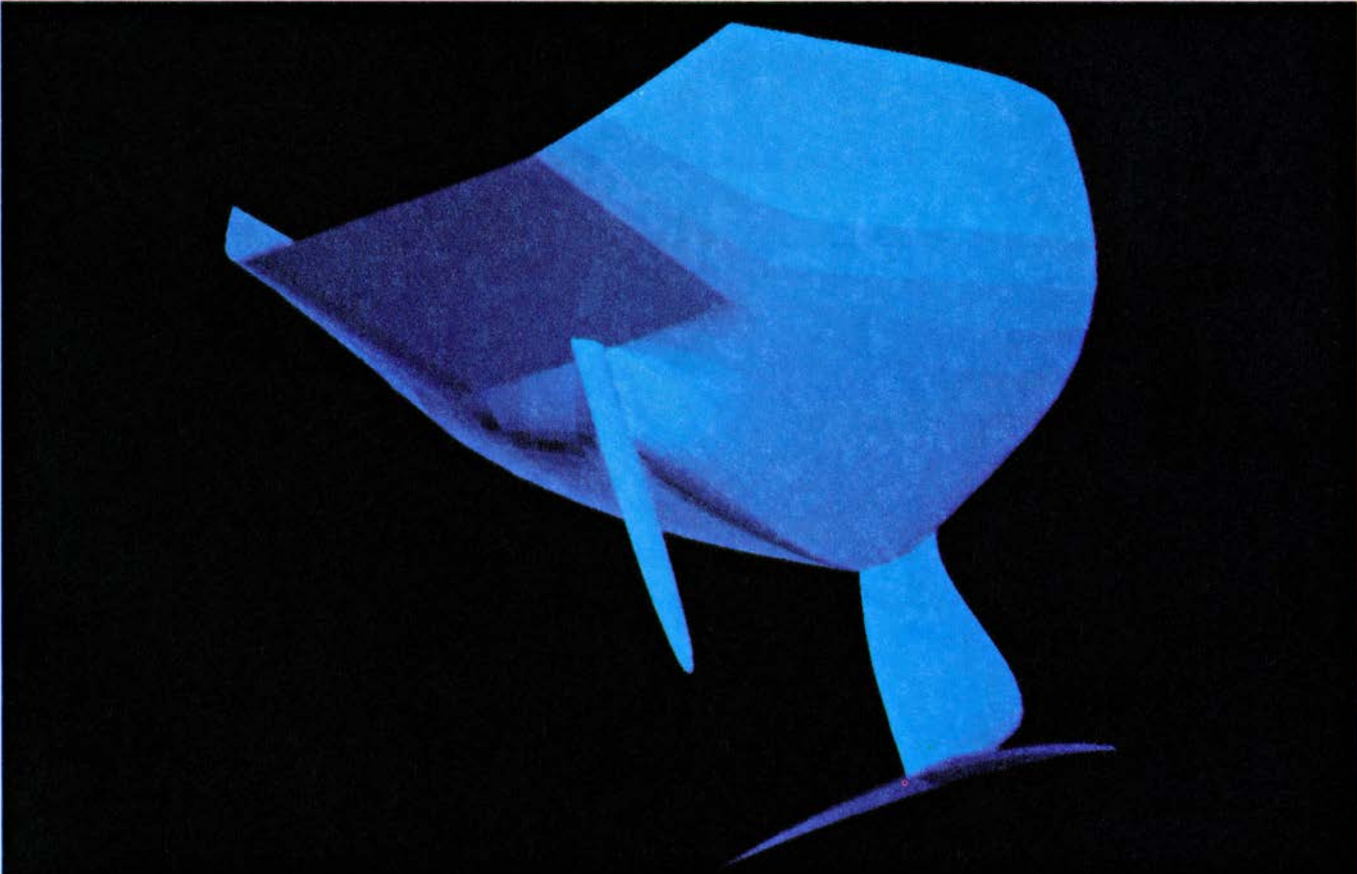
A principios de 1984, la Sail America reunió a un equipo de proyectistas, dirigido por uno de los autores (Marshall) y le encomendó la integración de un ambicioso programa de investigación y tecnología con la práctica tradicional del proyecto de yates. En ese equipo figuraban tres destacados diseñadores de yates norteamericanos: Britton Chance, Jr., Bruce Nelson y David Pedrick. A la postre, el esfuerzo técnico exigiría la colaboración de casi 30 científicos e ingenieros, que contribuyeron con alrededor de 10 años-hombre. La mayor parte del trabajo lo realizaron la Science Applications Internacional Corporation (SAIC), bajo la dirección de uno de los autores (Salvesen), y un grupo de ingenieros de la Grumman Corporation, encabezados por Charles W. Boppe.

El grupo técnico elaboró el proyecto teniendo en cuenta dos características de las regatas de yates de la clase 12 metros. La primera es que las embarcaciones no tienen por qué ser exactamente iguales. La mayoría de regatas, incluidas las que se celebran en el marco de los Juegos Olímpicos, se disputan entre yates que responden a un mismo diseño, es decir, monotipos. En los yates de 12 metros, por el contrario, los proyectistas disponen de cierto margen para aplicar la tecnología disponible. La segunda característica es que las regatas de yates de 12 metros se disputan siempre entre dos unidades, en vez de hacerlo entre flotas, como sucede con los monotipos. Además, en el recorrido establecido figuran las ceñidas, que representan cuatro de los ocho tramos de la regata y algo más de la mitad de las 24 millas náuticas de distancia a cubrir. Como sabemos, ninguna embarcación de vela puede navegar directamente en contra del viento, sino que debe hacerlo de bolina, o sea, voltejeando, es decir, cambiando de rumbo de modo que lo reciba alternativamente por una y otra cara de las velas. Por esta razón, el éxito de una regata entre dos yates que navegan de bolina depende de la táctica y destreza de la tripulación y, en particular, de la velocidad del yate.

El proyecto de un yate de 12 metros debe satisfacer, en primer lugar, la llamada "regla de los 12 metros", que fija y regula la International Yacht Racing Union, de Londres. La regla en sí es una fórmula matemática muy sencilla, pero las aclaraciones pertinentes son tan complicadas que llenan 25 páginas de letra menuda. De hecho, la fórmula no es más que una combinación de medidas del casco y de la vela; por ejemplo, puede aumentarse la eslora del casco, pero ello obliga a compensarlo reduciendo proporcionalmente la superficie de la vela. La misma regla impone también otros límites al proyecto del yate de 12 metros, como son una manga (o ancho del casco) mínima, un calado máximo (o distancia de la quilla a la superficie del agua) y un desplazamiento también mínimo, que aumenta en relación con la eslora en la flotación y la altura máxima de las velas.

El papel fundamental de la regla es crear el proyecto general del yate de 12 metros, a partir del cual pueden construirse yates de poca eslora y muy ligeros, que cuentan con gran superficie de velamen y responden muy bien a las ventolinas, o, en el otro extremo del espectro, yates con mucha eslora, quilla muy pesada y poca superficie de vela, que son los mejores para los vientos duros.

En 1987, y por primera vez en la historia, la copa América iba a disputarse en el océano Indico, en aguas de Perth,

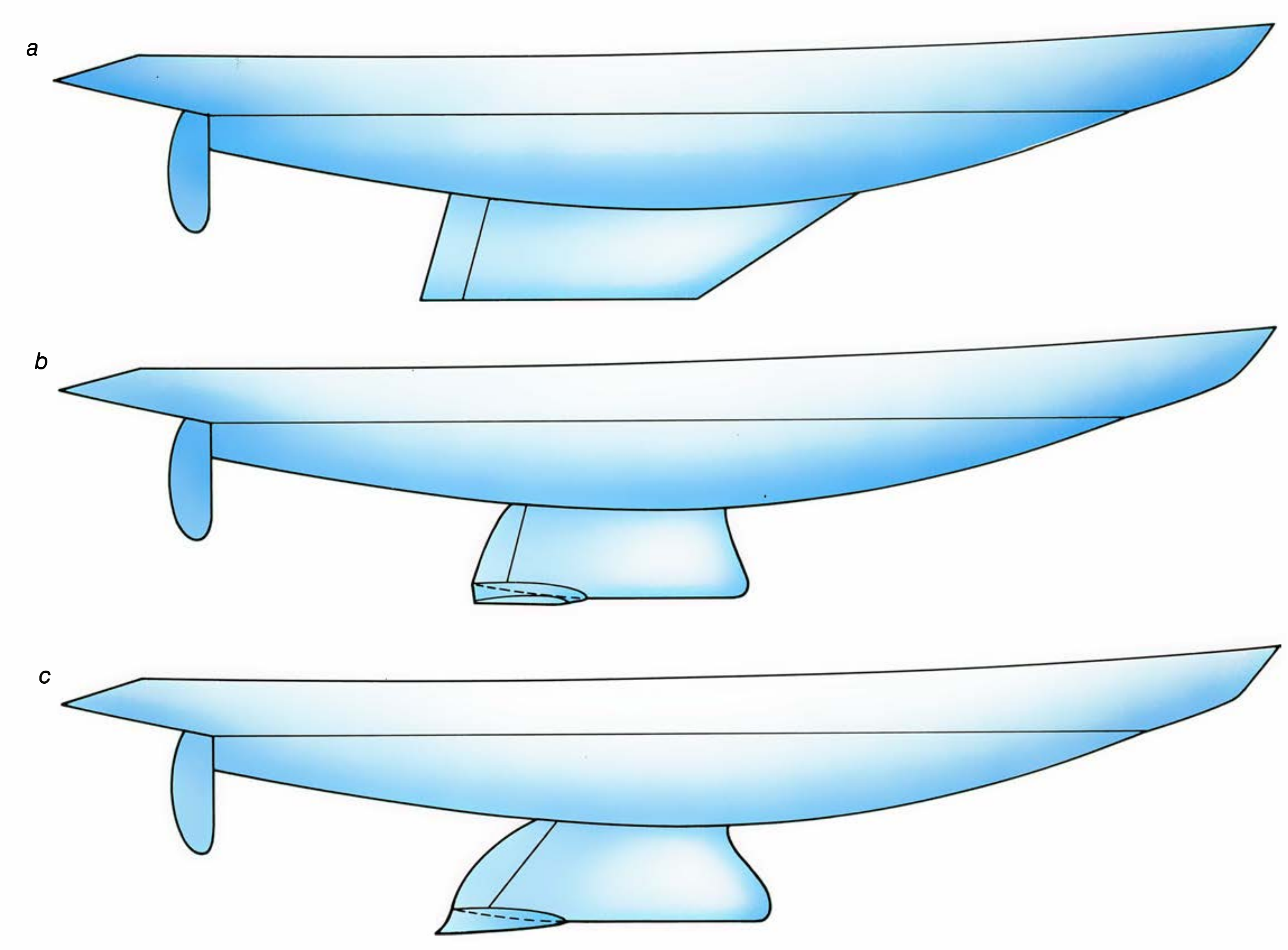


1. DISEÑO DE LA QUILLA DEL YATE *Stars & Stripes*, recogido en estas imágenes generadas por ordenador: la quilla sola (*arriba*) y la combinación quilla-timón vista desde popa (*abajo*). Además del elemento en forma de aleta situado en la base, la quilla cuenta con un timón de ajuste, movido por una rueda instalada en la bañera, independiente de la empleada para el gobierno del yate. Para elegir la quilla del *Stars & Stripes* el equipo de la Sail America Foundation analizó centenares de formas con un programa de ordenador redactado al efecto. Las imágenes ilustradas aquí las realizaron la Design Systems & Services, Inc., la Science Applications Internacional Corporation y la Hewlett-Packard Company, y corresponden al diseño final de la quilla del *Stars & Stripes*.

Australia Occidental, por cuyo motivo los proyectistas analizaron minuciosamente los principales problemas relacionados con la meteorología y el cronometraje. Todos los yates aspirantes, salvo cuatro, quedaron eliminados en las regatas disputadas en los meses primaverales australianos de octubre, noviembre y diciembre, cuando suelen soplar vientos más suaves que en verano. En efecto, el reto principal había sido obtener un yate capaz de pasar las eliminatorias, con ventolinas de primavera, y vencer luego también en la final, con los vientos duros del verano. Debía utilizarse el mismo casco en toda la competición, pero se permitía cambiar o modificar la quilla entre ambas series de regatas, respetando en todo momento los límites impuestos por la regla de los 12 metros.

Regatear con los vientos duros propios del verano de Perth imponía a los tripulantes un esfuerzo comparable al de los proyectistas. Los vientos de una velocidad media de 20 a 25 nudos (un nudo es una milla náutica por hora, es decir, 1,85 kilómetros por hora) exigían a los hombres y al aparejo más del doble del esfuerzo y de la resistencia que requerían las ventolinas de 12 nudos típicas de Newport, Rhode Island, escenario de las nueve ediciones de la copa América disputadas desde la Segunda Guerra Mundial. Se conocía mal la navegación con yates de 12 metros en aquellas condiciones de viento. De ahí que se plantearan numerosas preguntas: ¿Sería un acierto llevar una quilla con aletas, similar a la del *Australia II*, o, por el contrario, representaría un inconveniente? ¿Sería preferible dar al conjunto formado por la quilla y el timón otra disposición? Parecía lógico que para vientos duros el yate redujera la superficie del velamen en favor de la longitud del casco y el peso de la quilla; sin embargo, ¿hasta que extremo debía el proyectista profundizar en ese sentido? ¿Exigiría la mar gruesa, presumible en Perth, el empleo de cascos de nueva forma, que minimizara el aumento de resistencia? ¿Sería preferible dar más estabilidad al yate, incrementando la manga o el desplazamiento mínimos? Nadie podía adelantar las respuestas a esas preguntas, ni disponíamos de mucho tiempo para dar con ellas.

Para solucionar esas cuestiones concentramos los esfuerzos en diversas disciplinas, muchas de ellas propias de la tecnología naval. En cada análisis, los ordenadores ampliaban nuestra capacidad analítica y de decisión. Los datos meteorológicos y oceanográficos constituían la piedra angular, puesto que debía conocerse con exactitud las condiciones en que se iban a desarrollar las regatas. No menos importante resultaba el ensayo de prototipos; se hicieron 40 pruebas en tanques con modelos a escala 1:3, aplicando unos métodos totalmente nuevos para reducir y

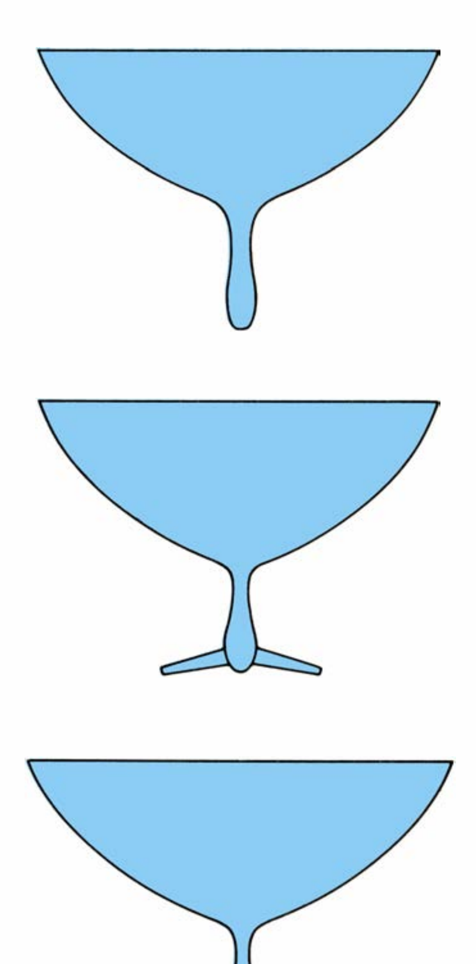


2. CONJUNTO FORMADO POR EL CASCO Y LA QUILLA de los yates de 12 metros, que debe ajustarse a la denominada regla de la clase 12 metros, fijada por la International Yacht Racing Union, la cual concede cierta libertad en lo concerniente a la forma de la última. Hasta 1983, la quilla trapezoidal de base corta (*a*) era la más usual. Aquel año, el *Australia II* (*b*) ganó la copa América, gracias a una quilla revolucionaria, de base más larga y dotada de aletas. El

comparar los resultados. Las conclusiones se comprobaron luego en cinco prototipos a escala real.

Para darle al casco la forma óptima se aplicó la teoría de la resistencia a las olas. Se utilizaron también programas de flujo potencial de fluidos en límites complejos para estudiar la hidrodinámica del casco y de la quilla y para valorar y mejorar centenares de formas. El análisis tradicional del comportamiento del casco en aguas en calma se amplió al correspondiente a la navegación entre olas y a las maniobras. Para evaluar el comportamiento de centenares de diseños y compararlos entre sí se aplicaron la teoría de probabilidades y la de juegos y se efectuaron simulaciones en el dominio temporal (que representan los cambios de posición y velocidad del yate durante la regata).

El núcleo del proyecto era un simulador de la dinámica del velero, el denominado Programa de Predicción de la Velocidad (Velocity Prediction Program, VPP). En la década de 1970, varios investigadores desarrollaron programas generales de ese tipo. En esta ocasión, uno de los autores (Oliver) redactó un VPP para el caso que nos ocupaba: el diseño y carrera de yates de 12 metros. Los datos a introducir eran las medidas físicas de la embarcación; la salida, una serie de predicciones de velocidad y rumbo respecto del viento real para cualquier combinación posible de dirección e intensidad del mismo.



***Stars & Stripes* (*c*) la mejoró, aumentando la longitud de la base y la anchura de las aletas. Los detalles exactos de esta quilla no se han hecho públicos aún.**

Los vientos real y aparente (este último es el que actúa sobre las velas) figuran entre los factores que el VPP tiene en cuenta. Igualmente sucede con las fuerzas aerodinámicas generadas por las velas y, en menor grado, por la obra muerta, o parte del yate situada fuera del agua. Se trata de las fuerzas de derrame, paralelo al viento aparente, y normal, perpendicular al mismo [*véase la figura 3*]. El VPP también tiene en cuenta las fuerzas hidrodinámicas generadas por el casco: la resistencia, opuesta al movimiento del yate, y la fuerza lateral, perpendicular a aquélla. Esos cuatro vectores deben sumar cero para que el movimiento sea uniforme. Además, los momentos netos, es decir, los efectos de los pares de fuerzas que producen la rotación del yate alrededor de un eje, deben estar en equilibrio; en particular, para que el ángulo de escora sea constante, el momento adrizante (producido por el lastre y la forma del casco) debe contrarrestar al escorante (debido al efecto del viento sobre las velas).

Todas las fuerzas y momentos citados dependen de la velocidad del viento real, del ángulo de incidencia del mismo, del ángulo de escora y de la velocidad del yate. Igualmente dependen de otras variables, derivadas del modo en que vayan dadas y cazadas las velas, cuyas condiciones óptimas debe indicar el programa, al tiempo que resuelve el equilibrio de fuerzas y momentos.

Simultáneamente, el programa puede optimizar también el rumbo del yate. El patrón que navega remontando el viento puede encontrar siempre una relación idónea entre la velocidad del yate y el ángulo de incidencia del viento real. Así, al arribar, o aumentar el ángulo que forma el viento con la proa, la velocidad del yate es mayor, puesto que en esas condiciones la componente hacia proa de la presión normal del viento es superior que antes; pero también crece la distancia a navegar hacia barlovento.

Y viceversa: navegando de bolina ardiente, es decir, con la proa muy cerrada al viento, la distancia a recorrer por el agua es menor que antes, pero el yate anda más lento. Entre ambas formas de recibir el viento se encuentra la óptima, en la cual la relación entre la distancia y la velocidad es tal que el yate, navegando al rumbo correspondiente, llegará al punto de destino situado a barlovento en el tiempo mínimo. Algo similar ocurre navegando con vientos largos: para cada velocidad existe un determinado ángulo de incidencia del viento real respecto del rumbo, generalmente distinto de la navegación en popa cerrada, es decir, con el viento por la misma popa, para el cual la velocidad del yate resulta máxima. El programa de predicción de velocidad resulta de gran ayuda en la identificación de esos ángulos óptimos.

El modelo matemático de velero que ofrece del VPP, además de proporcionar respuestas concretas, resulta muy útil para el proyecto de yates de vela. El coste de la ejecución del programa de ordenador es despreciable, tanto en tiempo como en dinero (menos de 15 dólares), al lado de una mera prueba en un tanque (25.000 dólares) o de la construcción y ensayo de un yate real (de medio a un millón de dólares). El ordenador añade a ello la ventaja de analizar gran cantidad de conceptos y opciones en poco tiempo. Además, la precisión matemática de las soluciones permite distinguir de modo fiable las menores variaciones de los resultados, lo que posibilita una optimización sistemática. El VPP da también respuestas cuantitativas a muchas preguntas que antes el proyectista sólo podía deducir haciendo uso de la intuición y la experiencia.

Uno de los principales objetivos del diseño del yate era la quilla. El *Australia II* había obtenido la victoria gracias a las aletas acopladas en ella. Por supuesto, pretendíamos igualar y luego superar ese logro, por lo que estudiamos cualquier forma, incluso de características fuera de lo común, susceptible de proporcionar alguna ventaja. Los resultados ofrecidos por el ordenador, sumados a los ensayos correspondientes, nos brindaron un conocimiento, bastante completo a nuestro entender, del comportamiento de la quilla con aletas proyectada por el australiano Ben Lexcen para el *Australia II*. Y aunque profundizamos en esa dirección y sometimos a ensayo varios tipos de apéndices, ninguno nos pareció

más prometedor que la mejora del propio diseño de Lexcen.

La quilla de un yate de vela ejerce dos funciones complementarias. La primera es que actúa como lastre, de tal modo que genera la fuerza lateral hidrodinámica necesaria para contrarrestar la normal producida por el viento sobre las velas. En su condición de lastre, la quilla se opone al momento escorante de las velas. En los yates de 12 metros el lastre es de plomo y su peso supone del 70 y al 80 por ciento del desplazamiento total de la embarcación. La segunda función de la quilla consiste en establecer la posición vertical del centro de gravedad del yate, que depende de la disposición del lastre. Cuanto más bajo esté dicho centro de gravedad más estable resultará el yate.

Para lograr que el yate tenga la estabilidad deseada, el proyectista puede adoptar la quilla en forma de paralelogramo, con la parte inferior más larga que la superior y terminada de forma algo aguda o puntiaguda, en sustitución de la quilla tradicional, que es más larga en la parte superior que en la inferior. (Aquel tipo de quilla fue otra novedad introducida por el *Australia II*.) Por otro lado, desciende el centro de gravedad de la embarcación si se aumenta el grueso de la parte inferior de la quilla, o incluso disponiendo en esa parte un bulbo currentiforme.

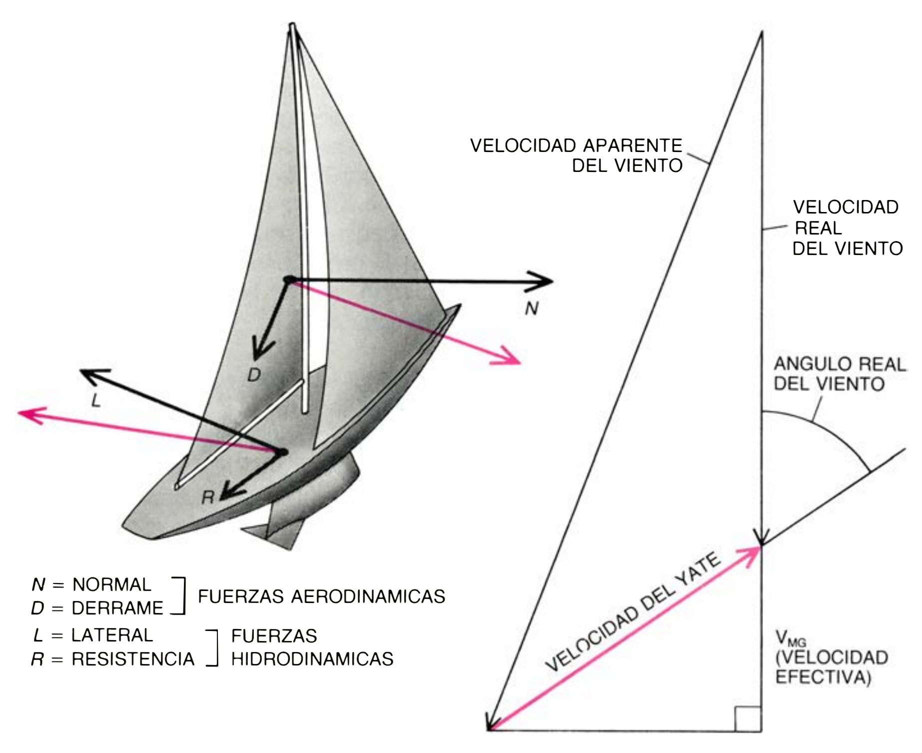
Por sus características, la quilla influye de modo muy notable en cuatro de las cinco formas de resistencia que actúan sobre el casco de un yate en movimiento. En primer lugar, si la quilla no es perfectamente currentiforme o está mal alineada con el flujo del agua que discurre en contacto con el casco producirá una resistencia innecesaria (que se genera cuando el flujo se "separa", es decir, se vuelve turbulento). En segundo lugar, la quilla posee una gran fracción de superficie mojada y es muy corta en la dirección del flujo, por lo que contribuye de modo desproporcionado a la resistencia de fricción. En tercer lugar, puesto que avanza a muy pocos metros por debajo de la superficie del agua, la quilla contribuye notablemente a la resistencia producida por la formación de olas por parte del yate. En cuarto lugar, la forma de la quilla incide de manera muy importante sobre la resistencia inducida, que depende de la fuerza lateral. (La quinta forma de resistencia procede de las olas superficiales que el yate encuentra durante la navegación.)

La resistencia inducida, que constituye la mayor aportación de la quilla a la resistencia total, viene a ser el precio a satisfacer por la producción de la fuerza lateral. Cuando una aleta, o cualquier otro elemento, genera una fuerza lateral constante, transfiere sin cesar momento al fluido donde está inmerso. Ese momento se manifiesta en la estela de la aleta, que representa la perturbación que deja en el fluido. El trabajo realizado por la aleta, o resistencia inducida, corresponde a la energía cinética de dicha perturbación.

La resistencia inducida crece proporcionalmente al cuadrado de la fuerza lateral (si ésta se multiplica por dos, aquélla lo hace por cuatro) y disminuye cuando se incrementa la amplitud de las aletas (si ésta se multiplica por cuatro, aquélla se reduce a la mitad). El proyectista puede reducir la resistencia inducida concediendo más amplitud a las aletas, puesto que, dadas las limitaciones impuestas por el reglamento de la clase 12 metros, resulta escasa la posibilidad de lograrlo aumentando el calado de la quilla. Esa fue la razón de que estudiáramos los sistemas no planares. Desde hace tiempo se conoce en aerodinámica que, dispuestas del modo adecuado, las superficies múltiples pueden crear una fuerza lateral con menor resistencia inducida que un plano simple de idénticas dimensiones. Vale de ejemplo el biplano; también, como caso muy similar al de la quilla con aletas, el ala de un monoplano con un elemento vertical en el extremo. En efecto, el campo de las superficies múltiples nos llevó al diseño final de la quilla de aletas del *Stars & Stripes*, cuya forma no podemos aún revelar en detalle.

Boppe y sus asociados dirigieron la aplicación, al diseño de la quilla, de métodos de flujo potencial, que en la industria aeroespacial se utilizan para predecir las propiedades aerodinámicas de las formas complejas. Con tal objeto determinaron la fuerza lateral y la resistencia inducida de distintas combinaciones de quilla y aletas, obteniendo unas formas prometedoras que luego se sometieron a ensayo por medio de modelos y análisis VPP.

En lo concerniente a la resistencia a las olas, asumió la responsabilidad de la investigación un grupo de la SAIC dirigido por Carl A. Scragg y especializado en la materia. Empezaron con la aplicación del programa denominado teoría del buque sutil, redactado por Francis Noblesse, del David Taylor Naval Ship Research and Development Center, con sede próxima a Washington, a tres modelos de casco de 12 me-



3. EQUILIBRIO DE LAS FUERZAS en los dos fluidos, agua y aire, que determina el comportamiento de un yate de vela. Las fuerzas hidrodinámicas se descomponen en resistencia (*R*), de sentido opuesto al del movimiento, y fuerza lateral (*L*), perpendicular a aquélla. Las fuerzas aerodinámicas se descomponen en derrame (*D*), en el mismo sentido que el viento aparente, y normal (*N*), perpendicular a aquélla. El viento aparente es el vector resultante de la suma del viento real que sopla sobre el agua y del relativo, debido al movimiento del yate. El equilibrio de las fuerzas indicadas fue estudiado y resuelto matemáticamente con el Programa de Predicción de Velocidad (VPP), que simula la dinámica de los veleros en diversas condiciones.



4. DISEÑO DE LAS VELAS del yate *Stars & Stripes*; se simplificó y aceleró gracias al concurso de los ordenadores. Hasta el advenimiento de esos programas específicos de proyecto el diseño se efectuaba dibujando las velas a mano, trazándose la versión final a escala natural sobre el suelo de un local espacioso.

tros que se habían sometido a pruebas de tanque. Los primeros resultados fueron descorazonadores: las resistencias predichas eran muy superiores a las obtenidas en las pruebas efectuadas en tanques y su rápido ascenso característico empezaba a una velocidad muy inferior a la supuesta.

Scragg observó, sin embargo, que, a pesar del abultado error de los datos, las diferencias entre las resistencias relativas de los tres modelos eran muy semejantes a las previstas; esa pauta se mantuvo en las pruebas que se practicaron seguidamente. Por lo que concluyó que si el programa de ordenador apuntaba que un modelo ganaría velocidad en un ámbito determinado, tal ganancia se manifestaría realmente en las pruebas del modelo.

Así, la teoría del buque sutil, pese a no ser exacta en términos absolutos, se convirtió en la base del proyecto del casco. A partir de ella, los proyectistas idearon formas nuevas con escasa resistencia a las principales velocidades de regata, lo que contribuyó muchísimo al éxito del *Stars & Stripes*.

El proyecto del yate se benefició también de la atención puesta por los investigadores en la fricción superficial, o resistencia por viscosidad, producida por el agua y cuyo valor suele representar el 37 por ciento de la resistencia total. En el mercado se ofrecen muchos recubrimientos que supuestamente reducen aquella resistencia. Sin embargo, Thomas G. Lang, de la Semi-Submerged Ship Corporation, ensayó más de 30 productos distintos, sin que ninguno se mostrara superior a la superficie lisa, pintada y bien limpia. Con posterioridad, la empresa 3M sacó un recubrimiento especial, hecho de película de plástico y destinado a aviación, con ranuras microscópicas dispuestas paralelamente en su superficie. En virtud de los informes emitidos por la NASA sobre dicho recubrimiento, se seleccionaron las profundidades y separaciones óptimas de esas ranuras para las condiciones del *Stars & Stripes* y se fabricó una partida especialmente para el yate. Pese a la dificultad de alinear las ranuras con el flujo, cuya dirección varía en cada parte del casco, y de resolver el problema de la unión de las distintas piezas de plástico, los proyectistas consideran que el material redujo la resistencia por fricción entre el 2 y el 4 por ciento.

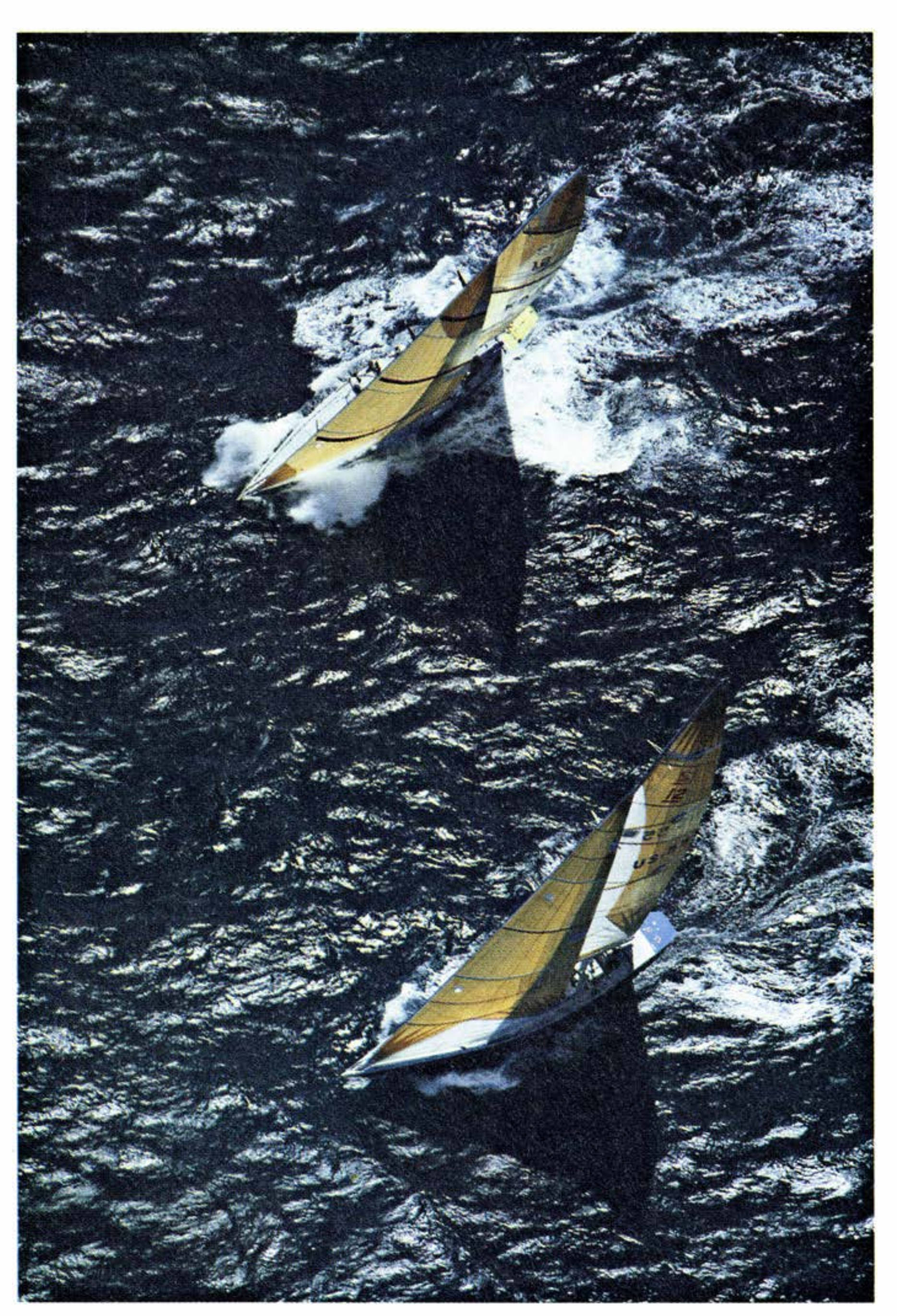
Otro aspecto a considerar era la meteorología. Debido a las grandes diferencias que se observan entre la navegación con ventolinas y con vientos duros, resultaba vital, para vencer en la regata, disponer de una predicción exacta del tiempo desde octubre hasta febrero. El yate ganador debería optimizar su adaptación a las condiciones predominantes. Además, tanto las velas como la táctica se elegirían en cada ocasión de acuerdo con la previsión meteorológica del día de la regata.

R. Leland Davis y Chris Bedford, de Galson Technical Services, recogieron y analizaron datos del pasado sobre las

condiciones de viento y mar en Perth. En la fase de proyecto sólo podíamos disponer de registros meteorológicos pretéritos, que resultaban de gran importancia para tomar gran número de decisiones relativas al proyecto, en particular, en lo concerniente a la eslora del yate. Estaba planeado que, en el transcurso de las regatas, se contaría con la previsión en diversas escalas temporales: de varias semanas, para decidir el cambio de quilla entre una serie de regatas y la siguiente; de un día, para saber cuándo convenía pedir una jornada de descanso, es decir, un aplazamiento de la regata; de unas horas, para elegir las velas a utilizar en el día, entre las 150 que formaban el equipo del yate, y de unos pocos minutos, para predecir cualquier cambio del viento durante la regata. Nuestra previsión se servía de modelos de ordenador estadísticos y numéricos, que se alimentaban con la información obtenida mediante radares meteorológicos Doppler instalados en la costa.

Otra faceta importante fueron las pruebas con prototipos de yates a escala natural. Bajo la dirección de Robert Hopkins, Jr., de Sail America, se llevó a cabo un ambicioso programa de recopilación y análisis de las pruebas realizadas en Hawai durante diez meses, a partir de octubre de 1985, que continuaron en Australia durante otros cinco meses más, en pleno período de regatas. El instrumental y los programas de ordenador los proporcionó Richard C. McCurdy, de Ockam Instruments, Inc. En los prototipos se instalaron transductores que medían la velocidad, el viento aparente, los ángulos del viento, escora y timón, la posición del modelo y la demora y distancia relativa de otro yate de pruebas usado como referencia. La información recogida se pasaba a la embarcación de apoyo, donde la recibía un MicroVax II, de la Digital Equipment Corporation, que la transmitía a otro MicroVax II instalado en tierra, donde se analizaba. La información obtenida por ese esforzado procedimiento resultaba de gran importancia para validar el VPP y evaluar el comportamiento real de las embarcaciones en condiciones reales.

La profundización en materia de tecnología debía ir más allá de los factores que interesaban directamente al yate. Las regatas poseen una importante componente aleatoria, puesto que el comportamiento de los yates depende de la velocidad del viento y de las condiciones del mar, las cuales varían estocásticamente de un día a otro. Por esa razón, los resultados del VPP no son concluyentes, e incluso pueden dar lugar a engaño, en especial cuando se pretende establecer la clasificación de dos yates en orden de méritos a partir de una serie de regatas. También se llegó a la conclusión —a la sazón sorprendente, pero que ahora nos parece obvia— de que no era posible prever cuál sería el diseño más apto para una determinada serie de regatas sin conocer las características de los competidores. Ello nos obligó a investigar cuanto pudimos los yates de los competidores y a desarrollar métodos de teoría de probabilidades y de juegos para evaluar debidamente el comportamiento de nuestro proyecto frente a cada aspirante y defensor.



5. FINALISTAS DE LA COPA AMERICA de 1987: *Stars & Stripes*, que aparece en cabeza en la fotografía, y *Kookaburra III*, de Australia. *Stars & Stripes* llegó a las finales tras derrotar a doce embarcaciones aspirantes, de diversos países; por su parte, *Kookaburra III* tuvo que vencer a cinco defensores australianos.

Con ese propósito desarrollamos dos programas de simulación de regatas entre dos yates. El primero, basado en el cálculo de probabilidades, tenía en cuenta, entre otros factores: la diferencia de tiempo invertido por ambos yates en función de la velocidad del viento; la distribución de probabilidades de la velocidad del viento a lo largo del mes; una serie de elementos casua-

les, como las variación de las condiciones de viento y mar, los errores o accidentes y la introducción de una ventaja opcional en favor de uno de los yates, por ejemplo, de 30 segundos, y que se podría justificar por la superioridad de las velas, táctica o entrenamiento del personal que lo tripulaba.

El segundo programa era mucho más complejo. Además de los elementos del primer programa, tenía en cuenta las variaciones del viento en un día entero de regatas, debidamente almacenadas en datos; las diferencias de velocidad relativa en las distintas largadas; las interacciones entre los yates cuando navegan muy próximos y el resultado incierto de las pruebas para las que se obtienen cálculos muy igualados. La respuesta obtenida en cada caso constituye un valor de probabilidad: por ejemplo, el mes de noviembre, en aguas de Perth, el yate *A* vencerá al *B* en el 59 por de las regatas.

Recurrimos a la teoría de juegos porque proporciona respuestas válidas para la toma de decisiones cuando la solución no es fácil. Aplicamos la teoría de juegos de suma cero con dos personas al problema de seleccionar el mejor proyecto de acuerdo con las condiciones de las regatas. (En los casos de suma cero, la victoria de un contrincante significa la derrota del otro.) Supóngase que Rojo representa un yate de 46 pies (14,02 metros) y Azul, el nuestro, otro de 48 pies (14,63 metros); entonces, si no se concede ventaja a ninguno de los yates, venceremos el 28 por ciento de las veces en noviembre y el 72 por ciento en enero. ¿Qué eslora debe elegir cada bando para obtener el máximo provecho si uno de los contrincantes posee cierta ventaja global?

Las posibilidades pueden disponerse en forma de matrices. Así, la matriz en la que Azul se beneficia de un error de 30 segundos cometido por el otro indica que la eslora más idónea para Azul es de 48 pies, mientras que la de Rojo, para vencer, en el supuesto de que tenga todas las demás circunstancias a su favor, debe ser de 45 o 47 pies. Pero aun en este caso Rojo sólo tendría una probabilidad de éxito del 37 por ciento en cada regata.

Si bien en la estrategia del diseño del *Stars & Stripes* confluyó la totalidad de las técnicas expuestas, el yate debe su existencia a los programas de predicción de la velocidad y de modelo de regata; sin sus precisos dictámenes no se habría construido. Los dos primeros proyectos de yate de 12 metros, llamados igualmente *Stars & Stripes*, aunque designados luego '85 y '86, por el año de construcción, habían demostrado una potencia, estabilidad y velocidad sin precedentes con vientos duros. Además, el *Stars & Stripes* '85 era ligeramente más rápido en la mayoría de condiciones, por cuyo motivo los tripulantes habían depositado su absoluta confianza en la embarcación.

Sin embargo, a finales de 1985 y principios de 1986, mientras el equipo de Sail America se entrenaba y efectuaba los ensayos en Hawai, los candidatos defensores australianos y muchos de los aspirantes las hacían en Perth, aprovechando la celebración allí del Campeonato Mundial de la clase 12 metros. Gracias a una observación muy cuidadosa, que comprendía en particular la realización de un concienzudo análisis fotogramétrico, supimos que todos los yates eran bastante más pequeños de lo que nosotros habíamos juzgado óptimo para las condiciones propias del verano australiano. El programa de simulación de regatas evidenció que, si bien era elevada la probabilidad de que *Stars & Stripes* '85 derrotara a cualquier competidor en cuatro de las siete regatas a disputar en los meses de enero o febrero, difícilmente podría superar la fase previa de eliminatorias frente a 13 contrincantes cuya eslora era, de promedio, dos o tres pies más corta.

Ante esa predicción, la Sail America optó por construir otra yate más pequeño y capaz de competir en la eliminatorias previas con probabilidades de éxito. El nuevo proyecto se aprovechó de la adopción de mejores formas del casco (desarrolladas a partir de la teoría del buque sutil y confirmadas por las pruebas en tanques) y de la mejora del diseño de la quilla por ordenador. La eslora elegida era ligeramente superior a la de los demás yates, según sugería la teoría de juegos. Una vez superadas las eliminatorias, habría que aumentar el ancho de las aletas, lastrar el yate de nuevo para darle más desplazamiento (lo cual le dotaría también de más eslora en la flotación) y aumentar el bulbo de la quilla, para descender el centro de gravedad. Con esos ajustes para los vientos duros del verano, resultaría muy difícil vencer al yate en series de cuatro a siete.

Se construyó el velero (en un tiempo récord) y se ensayó en Hawai lo justo para comprobar su superioridad frente a los proyectos anteriores. El éxito de la empresa es ya una página más de la historia de la navegación deportiva.

Colisiones entre protones con espín

El resultado de una colisión entre dos protones muestra una sorprendente dependencia de las direcciones de sus espines. Los resultados cuestionan la teoría dominante acerca de la estructura y las fuerzas de los protones

Alan D. Krisch

Todos los constituyentes de la materia —protones, neutrones y electrones— parecen girar como peonzas. El giro es una propiedad mecánico-cuántica básica; cada partícula tiene una cantidad de giro determinada, el momento angular de espín, igual que posee una masa y una carga eléctrica características. Cuando chocan dos partículas dotadas de espín, las direcciones de sus espines pueden condicionar su modo de dispersión.

En un conjunto de experimentos con aceleradores, mis colegas y yo hemos variado el espín y la energía de los protones colisionantes y hemos observado comportamientos no esperados, a menudo sorprendentes, que ponen en entredicho la teoría usual de la estructura y las fuerzas de los protones, la cromodinámica cuántica (QCD).

La investigación empezó en 1973 en el Sincrotrón de Gradiente Cero (ZGS) del Laboratorio Nacional de Argonne. Allí mi grupo de investigación, de la Universidad de Michigan, dispersó haces de protones polarizados en blancos cuyos protones estaban también polarizados, es decir, todos giraban en la misma dirección [véase "El espín del protón", por Alan D. Krisch, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; julio de 1979]. Los resultados demostraron que el espín desempeñaba un papel importante en las interacciones de alta energía entre protones: las colisiones violentas entre dos protones tenían lugar principalmente cuando el haz y el blanco estaban polarizados en el mismo sentido. Cuando los protones del haz y los del blanco giraban en sentidos opuestos, parecían cruzarse, a menudo sin interaccionar entre sí.

En el ZGS estábamos limitados a energías de experimentación de unos 13 GeV (13.000 millones de electronvolt). Después de una laboriosa modificación, que llevó seis años, de otro acelerador, el Sincrotrón de Gradiente Alternante (AGS) del Laboratorio Nacional de Brookhaven, podemos investigar ya los efectos del espín del protón a energías mucho mayores: hasta 18,5 GeV, cuando haz y blanco se hallan polarizados, y hasta 28 GeV con sólo el blanco polarizado. Las sorpresas se han multiplicado. Conforme la energía de choque de los protones aumenta, los efectos del espín parecen oscilar. A nuestras energías más elevadas, los efectos del espín revisten una importancia especial.

A determinado nivel, era fácil entender nuestro asombro. La energía asociada con el espín de un protón es constante; por consiguiente, el papel desempeñado por el espín debe disminuir al aumentar la energía de la colisión. A energías suficientemente altas ha de importar poco que los dos protones colisionantes giren en el mismo sentido o en sentidos opuestos. Atribuir tanta relevancia al sentido de la dirección pone sobre el tapete nuestro corto conocimiento de la interacción entre protones. Los experimentos llegan incluso a cuestionar el modelo normalmente aceptado de la estructura interna del protón, en virtud del cual lo compondrían tres constituyentes elementales: los quarks, que se mantendrían ligados por la fuerza nuclear fuerte (la fuerza descrita por la QCD).

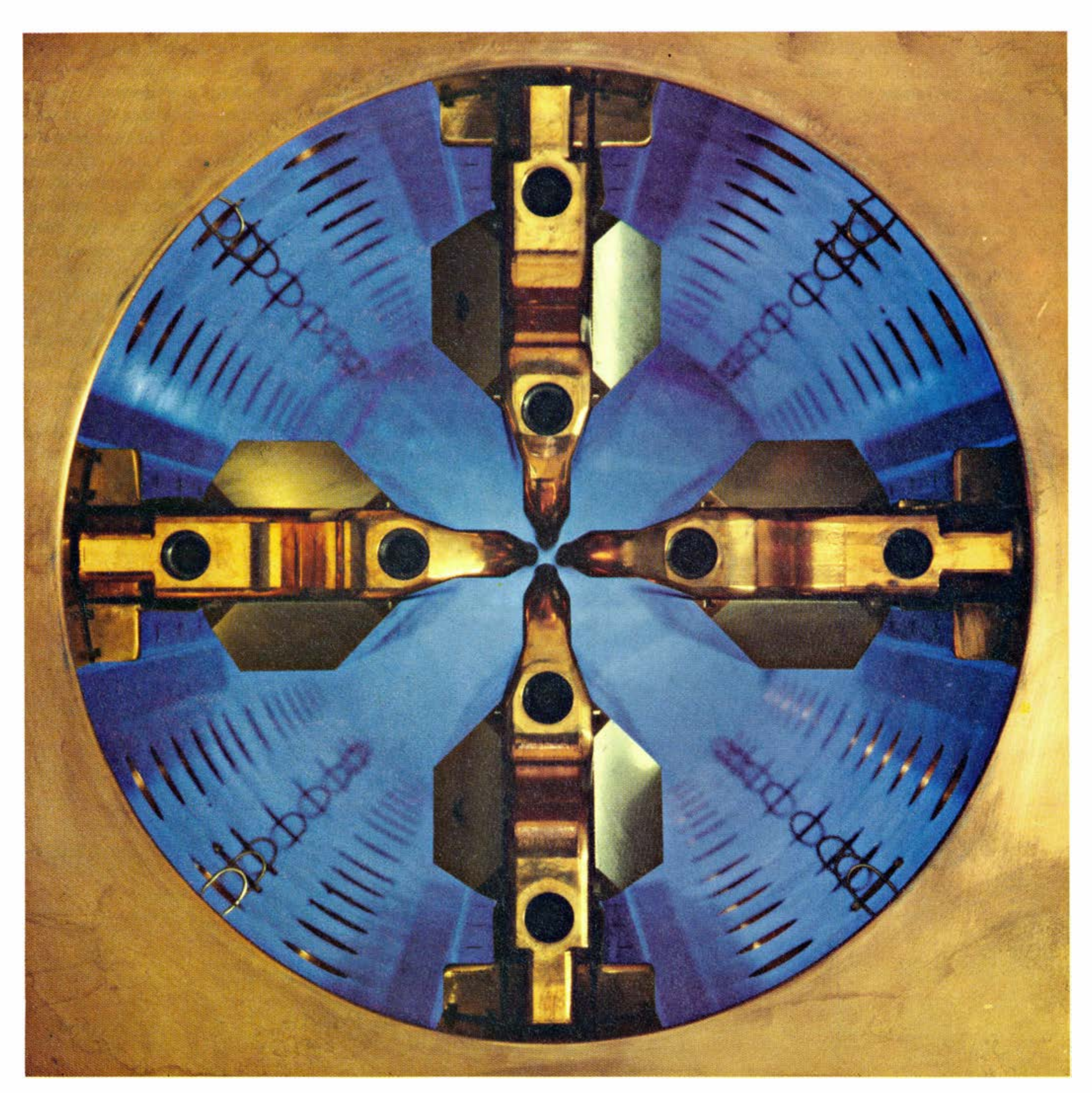
Nuestros nuevos resultados no son ciertamente el primer caso en que el fenómeno del espín ha sorprendido y confundido a los físicos. Cuando Samuel A. Goudsmit y George E. Uhlenbeck propusieron en 1925 que el electrón poseía una propiedad llamada espín, Wolfgang Pauli les contestó que tal idea era una locura. Sin embargo, durante los últimos años de la década de 1920 y los primeros 30, el espín se convirtió en un elemento importante en el desarrollo de la mecánica cuántica y la física atómica, sobre todo en las aportaciones de P.A.M. Dirac.

En la década de 1940, los físicos nucleares pensaban que los efectos del espín adquirían sólo importancia en las colisiones atómicas de baja energía, pero resultarían irrelevantes en las colisiones nucleares a energías de varios millones de electronvolt. Así, hasta que Charles L. Oxley, de la Universidad de Rochester, y sus colaboradores encontraron pruebas de grandes efectos de espín en colisiones producidas a varios cientos de millones de electronvolt. De la sorpresa y el revuelo consiguiente da fe un trabajo publicado en 1954 por Enrico Fermi.

La mayoría de los físicos de altas energías creyeron entonces que el espín carecería de especial interés en colisiones entre partículas elementales a energías de miles de millones de electronvolt. Durante años, esa idea no tuvo otro soporte que una serie de difíciles experimentos realizados por Owen Chamberlain y Emilio Segré, de la Universidad de California en Berkeley, entre otros. Llegamos así hasta finales de la década de 1950. Anatole Abragam, del Collège de France, y Carson D. Jeffries, de Berkeley, sugirieron por aquellas fechas la construcción de blancos de protones polarizados. La técnica, que ha conocido un extraordinario éxito, utiliza una baja temperatura y un intenso campo magnético para polarizar los espines de ciertos electrones en granos congelados de material del blanco; el campo magnético insta la "alineación hacia arriba" de los espines de los electrones. Se aplica entonces ra-

diación de microondas para transferir la alineación del espín de los electrones a los protones próximos, provocando su giro en una dirección. Los experimentos que emplearon blancos de protones polarizados en los años 60 y los primeros 70 en Berkeley, en el CERN (Laboratorio Europeo de Física de Partículas) y en Argonne revelaron ciertos efectos de espín en colisiones de alta energía; aunque pequeños, resultaban muy interesantes. Sin embargo, la mayoría de físicos de altas energías seguían aferrados a la vieja idea del carácter irrelevante del espín, cada vez más despreciable a medida que se fuera ascendiendo en la escala de las energías.

En 1973, mi grupo inició una línea distinta de investigación en el Sincrotrón de Gradiente Cero: polarizamos haz y blanco. Mantuvimos la polarización del blanco con un imán especial que tenía un campo intenso (25.000 gauss) y con una mezcla de helio 3 y helio 4 líquidos que retenía la temperatura del blanco a medio grado sobre el cero absoluto. Al propio tiempo, nos servimos de un complejo sistema de imanes para mantener polarizado el haz de protones durante la aceleración del mismo. Provocamos la colisión de los protones del haz polarizado con los protones del blanco polarizado, y tomamos las primeras



1. ESTE CUADRUPOLO DE RADIOFRECUENCIA acelera los protones en el Sincrotrón de Gradiente Alternante (AGS) del Laboratorio Nacional de Brookhaven. El ingenio consta de cuatro polos eléctricos, dos positivos y dos negativos, colocados de manera que los polos idénticos se hallen enfrentados. En este cuadrupolo de radiofrecuencia, que mide 1,5 metros de largo por 30 centímetros de diámetro, las polaridades alternan a un ritmo de 200 millones de veces cada segundo. Los protones que penetran en el mismo se han polarizado ya: se les hace girar en la misma dirección. El cuadrupolo mantiene la polarización mientras va acelerando los protones desde una energía inicial de 20.000 electronvolt (20 keV) hasta 760 keV. (Fotografía tomada por Mort Rosen, del Brookhaven.)

mediciones de colisiones elásticas entre protones que giraban en direcciones conocidas. Llámase elástica la colisión en que toda la energía del protón incidente se distribuye entre los dos protones emergentes; inelástica, cuando parte de la energía se emplea en la creación de nuevas partículas. Nosotros nos ceñimos a las colisiones elásticas porque parecen, a la vez, sencillas y fundamentales.

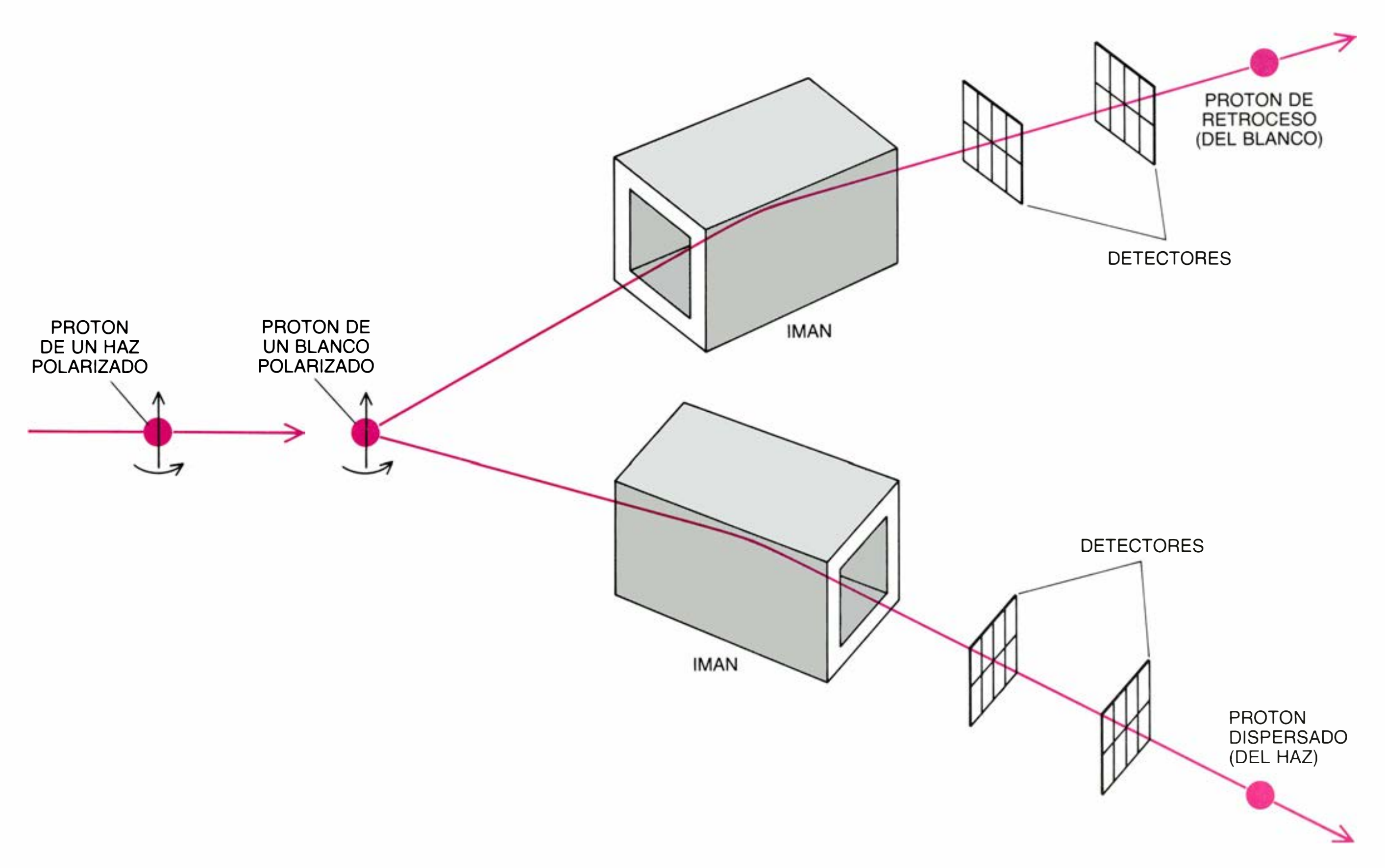
Estudiamos la dispersión de protones en cuatro estados de espín iniciales. En el primero, el espín de los protones del haz y de los protones del blanco estaban, ambos, orientados hacia arriba (es decir, si cerramos los dedos de la mano derecha en la dirección de la rotación el pulgar se orientaría hacia arriba). Denominaré a este estado arriba-arriba: el primer "arriba" se refiere a la dirección del espín de los protones del haz y el segundo se refiere a la dirección de espín de los protones del blanco. Según esta convención, los tres estados iniciales restantes serán abajo-abajo, arriba-abajo y abajo-arriba. La dirección del espín de los protones del haz se invertía cada tres segundos aproximadamente; la dirección del espín de los protones del blanco se invertía después de algunas horas.

Para analizar el interior del protón con la mayor hondura posible, provocamos las colisiones más violentas que estaban a nuestro alcance. Confiábamos en descubrir algunas nuevas pistas acerca de la naturaleza de los pequeños constituyentes que parece haber en el interior del protón, y que, según se cree, no pueden salir. Me refiero a los constituyentes que los teóricos llaman quarks. La teoría de los quarks desarrollada por Murray Gell-Mann, del Instituto de Tecnología de California, ha mostrado su eficacia en la explicación de las masas de muchas partículas de vida corta que se crean cuando chocan los protones. Por otro lado, la teoría de los quarks aplicada a las colisiones de partículas —la cromodinámica cuántica (QCD)— ha avanzado pocas predicciones que puedan comprobarse. La QCD es una teoría bastante flexible y ha sido capaz de ajustarse fácilmente a la mayoría de nuevos datos de colisiones que se han ido recabando. Pero, dado mi talante de científico bastante formal, me impresiona menos la adaptabilidad que el poder predictivo.

Tampoco acabo de ver claro cómo los quarks pueden vivir como partículas en el interior del protón y no fuera del mismo. Las inteligentes y atractivas ideas de la QCD que se han propuesto para explicar el confinamiento aparente de los quarks a lo mejor resultan correctas y quizá tenga que cambiar mi punto de vista, pasado de moda, de que las partículas deben ser objetos bien definidos. Creo, sin embargo, que una noción sencilla no ha de abandonarse en favor de otra compleja hasta que los datos sólidos de la experimentación sean contundentes.

Los mejores choques para analizar las fuerzas de espín de las partículas constituyentes del protón con la mayor profundidad posible son aquellos en los que los dos protones colisionantes rebotan en dirección exactamente perpendicular a la dirección del movimiento inicial. Tales colisiones transfieren la máxima fracción de la energía del protón incidente y resultan, por tanto, las más violentas. En nuestro experimento final en el ZGS estudiamos tales colisiones perpendiculares mientras íbamos variando la energía de los protones incidentes entre 4 y 13 GeV; a cada energía observamos qué sucedía cuando los protones giraban en el mismo sentido y cuando lo hacían en sentidos opuestos.

En concreto, medimos por separado



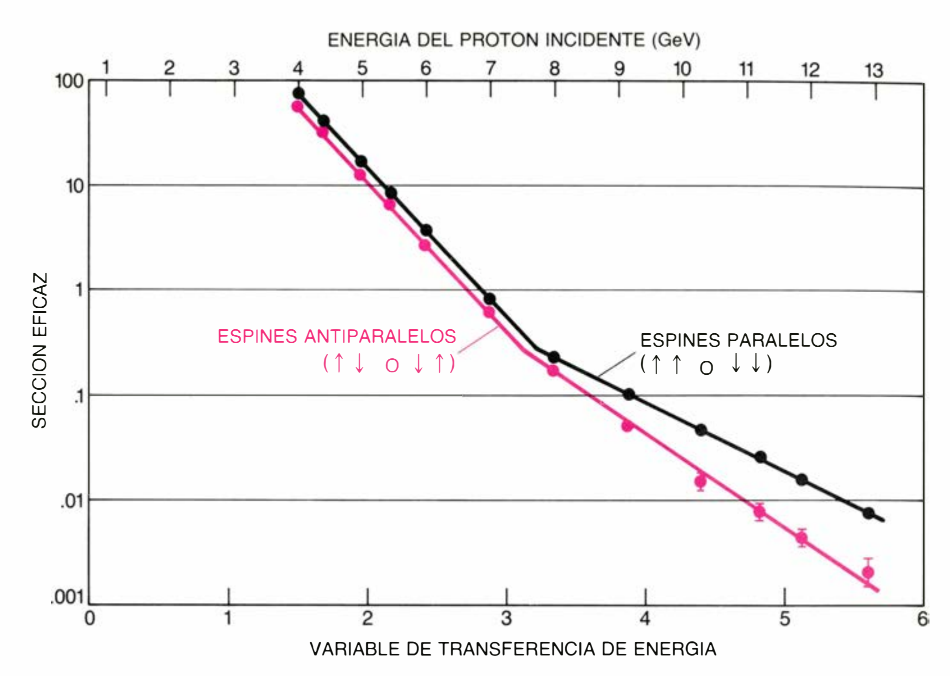
2. DISPERSION DE UN HAZ POLARIZADO DE PROTONES por un blanco fijo de protones, asimismo polarizados. Los detectores de partículas (*ilustrados detrás de los imanes*) registran los ángulos de dispersión de los distintos protones; el ángulo de desviación de los imanes indica la energía de los protones.

la probabilidad de una colisión elástica perpendicular para protones cuyos espines fueran paralelos (arriba-arriba y abajo-abajo) y para protones cuyos espines fueran antiparalelos (arriba-abajo y abajo-arriba). Esta probabilidad de colisión se conoce por sección eficaz para colisiones elásticas protón-protón a 90 grados. La sección eficaz, que puede imaginarse como el tamaño efectivo de los protones interaccionantes, suele representarse en función de la energía de la partícula incidente.

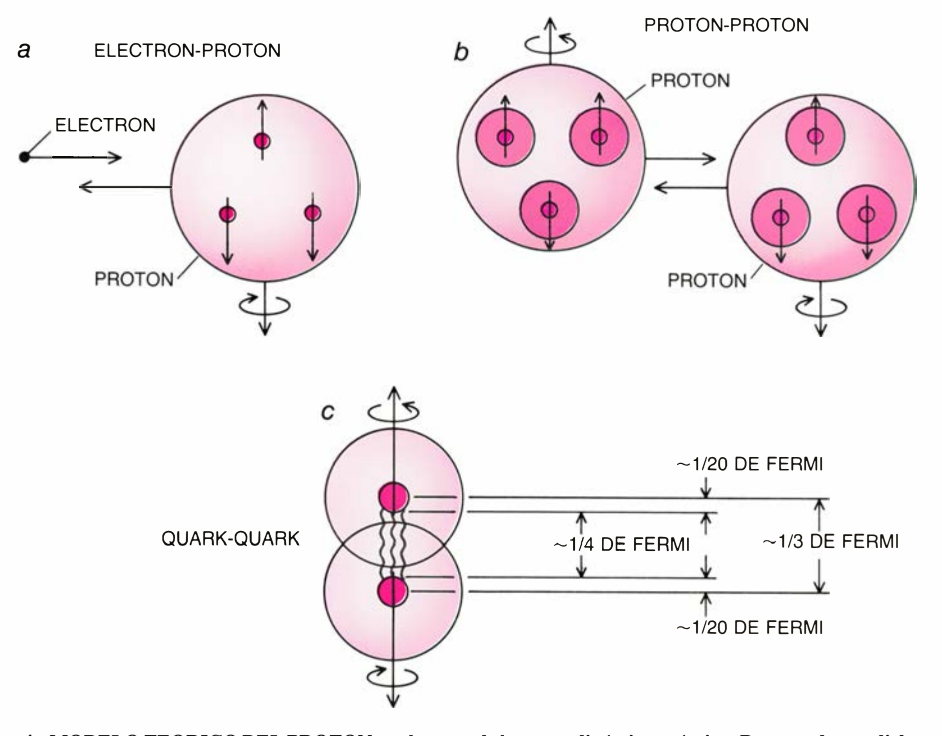
Nuestro experimento reveló dos pistas importantes para adentrarnos en los constituyentes del protón. La primera: la sección eficaz disminuye rápidamente mientras va aumentando la energía de la colisión hasta 8 GeV, mas, por encima de 8 GeV, cae sólo de manera gradual [*véase la figura 3*]. Lo que ese fenómeno informe acerca de la estructura del protón puede extraerse a través de un procedimiento matemático conocido por análisis de Fourier. La brusca disminución inicial de la sección eficaz indica que, a bajas energías, los protones sólo se rozan; parece como si las capas exteriores del protón fueran bastante blandas y grandes —en torno a un fermi, o 10^{-15} metros, de radio. La posterior caída gradual de la sección eficaz sugiere que en las colisiones a más alta energía intervienen objetos duros del interior del protón, el radio de los cuales vendría a ser aproximadamente de un tercio de fermi. Esta pista se muestra concorde con el modelo de tres quarks de la QCD.

¿Qué ocurre con la segunda pista? Digamos de entrada que resulta preocupante para los intereses de la QCD. Se ha observado, en efecto, que, a energías por encima de los 8 GeV, la sección eficaz cae antes cuando los espines de los protones son antiparalelos que cuando son paralelos. En otras palabras, los protones presentan mayor probabilidad de choque violento cuando sus espines son paralelos. A 13 GeV, la sección eficaz (la probabilidad de colisión) en el caso de espines paralelos cuadruplica la registrada en el caso de espines antiparalelos. Aunque ignoramos la causa real de este comportamiento extraño y totalmente inesperado, no parece una buena noticia para la QCD.

Según la QCD, de los tres quarks de cada protón con espín dos deben girar en el mismo sentido que el protón y el tercero lo hará en el opuesto. Por tanto, con independencia de que los espines de los protones que chocan sean



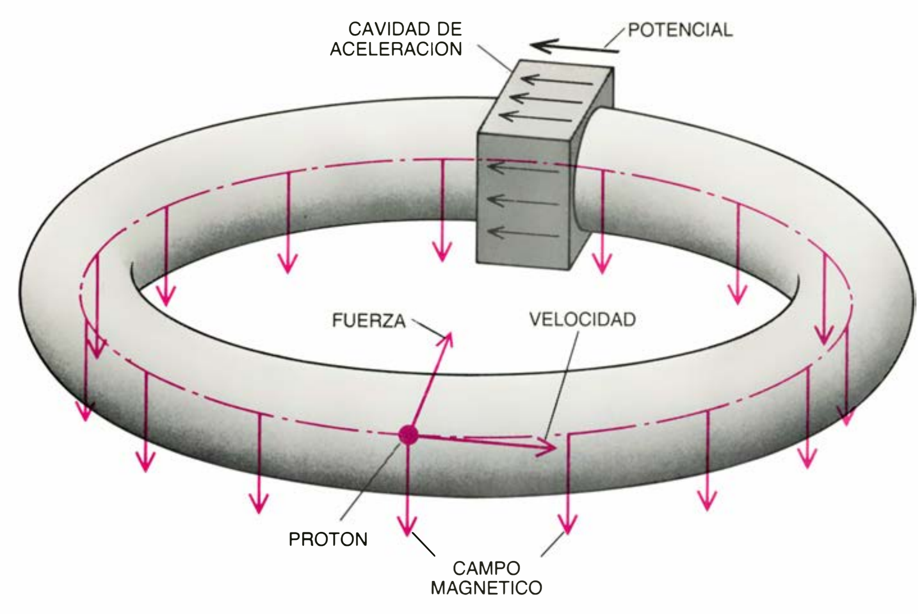
3. EL ESPIN AFECTA A LA DISPERSION DE PROTONES a altas energías. La sección eficaz a 90 grados —la probabilidad de colisión a dicho ángulo— se representa en función de la variable transferencia de energía de las colisiones. (Para un ángulo de colisión fijo, la variable transferencia de energía es proporcional a la energía del protón incidente.) Se han ilustrado dos conjuntos de datos, uno en el que los espines del protón incidente y el del protón del blanco eran paralelos y otro en el que los espines eran antiparalelos. Para valores de energía bajos, las secciones eficaces paralela y antiparalela son idénticas, tal como predice la teoría vigente de la estructura y propiedades del protón, la cromodinámica cuántica (QCD). A energías mayores, sin embargo, las secciones eficaces divergen notablemente. Ignoramos cuál sea la razón exacta de esa divergencia.



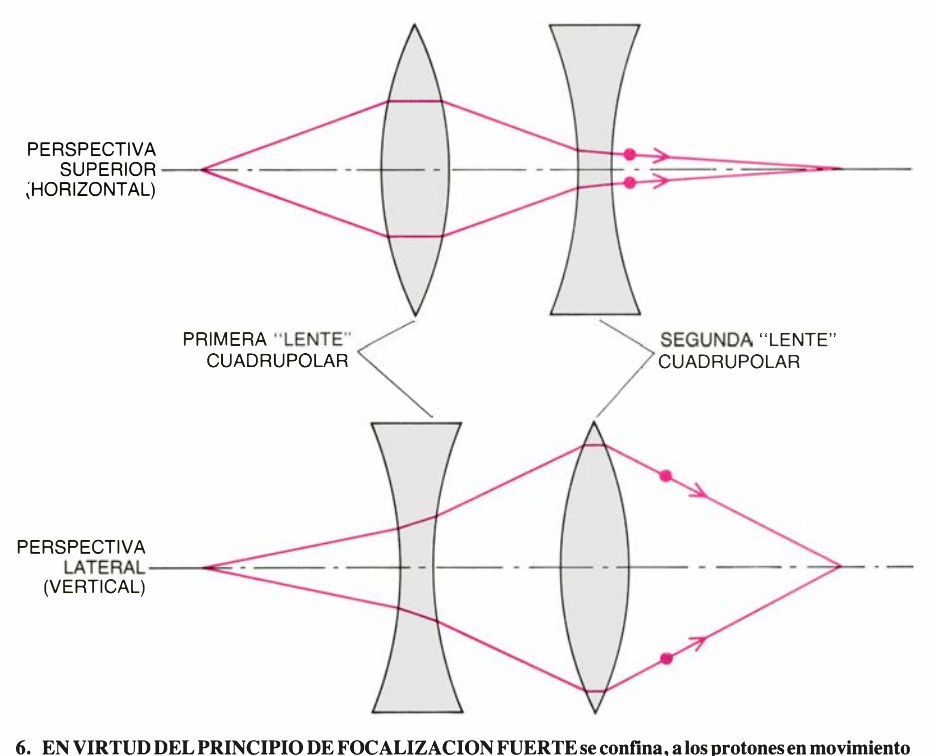
4. MODELO TEORICO DEL PROTON en el marco de la cromodinámica cuántica. De acuerdo con dicha teoría, la partícula se encuentra formada por tres constituyentes llamados quarks, ligados entre sí por la fuerza fuerte. De la colisión de electrones puntiformes con protones estacionarios en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford (*a*), un grupo de investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts y del SLAC obtuvieron datos que indicaron que los constituyentes del protón presentaban un radio inferior a una vigésima de fermi. (Un fermi es igual a 10^{-15} metros: aproximadamente, el radio de un protón.) Los datos del experimento del autor, en el que los protones se dispersaron con protones (*b*), mostraron que los constituyentes poseían un radio de un tercio de fermi, aproximadamente. Tomados en su conjunto, ambos resultados sugieren un modelo interesante, y posiblemente correcto, de los constituyentes del protón (*c*). Los datos del SLAC indican el tamaño de la carga eléctrica de los componentes. Cabe la posibilidad de que cada constituyente tenga un núcleo cuyo radio sea una vigésima de fermi y un campo de fuerza fuerte que se prolongue un cuarto de fermi. Cuando dos quarks chocan entre sí, el tamaño eficaz es del orden de un tercio de fermi.

paralelos o antiparalelos, las colisiones siempre involucrarán algún par de quarks cuyos espines sean paralelos y alguno cuyos espines sean antiparalelos. Los cálculos de la QCD permiten un factor dos de diferencia entre las secciones eficaces de espines paralelos y espines antiparalelos, pero un factor cuatro de diferencia no acaba de encajar en el marco de dicha teoría.

¿Qué indica una razón de cuatro? ¿Es aplicable la QCD sólo a colisiones más energéticas y violentas que las que estudiamos? Por desgracia, los teóricos no pueden ponerse de acuerdo en dónde empieza exactamente el intervalo de validez de la QCD. Como la razón parece crecer con la violencia y energía de las colisiones, nuestros datos no apoyan los postulados de la QCD. Para explicarlo, puede aducirse que los constituyentes que se "ven" en experimentos de colisión —aunque relacionados con los quarks que justifican las masas de las partículas— no son exactamente los tres quarks con espín de la QCD. Quizá el protón contiene algunos otros constituyentes. O quizás hay tres constituyentes, pero dejan de ser quarks independientes cuando chocan los dos protones.



5. EL SINCROTRON explota las propiedades de los campos eléctricos y magnéticos para acelerar los protones (partículas dotadas de carga eléctrica) hasta energías de muchos miles de millones de electronvolt. Se obliga a los protones a moverse en un haz circular siguiendo una cámara de vacío en forma de rosquilla mediante un campo magnético que se halla perpendicular al plano del anillo. Cada vez que el protón da la vuelta a la rosquilla, recibe un voltaje impulsor de unos 100 keV en la cavidad aceleradora (*arriba*).



6. EN VIRTUD DEL PRINCIPIO DE FOCALIZACION FUERTE se confina, a los protones en movimiento por el sincrotrón, en una suerte de rosquilla de radio pequeño; ello permite rebajar el tamaño de los imanes necesarios para curvar el haz de protones. El principio exige la colocación en fila de dos cuadrupolos opuestos. El primer cuadrupolo focaliza horizontalmente el haz de protones, pero lo hace diverger verticalmente; el segundo cuadrupolo focaliza verticalmente el haz y lo hace diverger horizontalmente. Ajustando las intensidades de los cuadrupolos, se focaliza el haz en ambas direcciones. (Dibujos realizados por Gabor Kiss.)

En nuestros experimentos de colisión a 90 grados alcanzamos el límite de energía de 13 GeV del ZGS. La generalización de los experimentos de espín a colisiones más violentas exigía un haz de protones polarizados de mayor energía. A finales de la década de 1970, un grupo de unos 80 científicos, ingenieros, técnicos y estudiantes de Argonne, Brookhaven y de las universidades de Michigan, Rice y Yale abordaron la adaptación del sincrotrón AGS de Brookhaven con el fin de que los protones dotados de espín pudieran acelerarse hasta energías de 20 GeV. El empeño valía la pena: cuando los protones con espín recorren una y otra vez el circuito del AGS durante su ciclo de aceleración de medio segundo, cubren unos 161.000 kilómetros a través de intensos campos magnéticos que fácilmente pueden arruinar su polarización, provocando que todos los protones giren en direcciones distintas. Los campos magnéticos del AGS, mucho más intensos que los del ZGS, representan, por tanto, un grave problema. De hecho, un grupo de trabajo de la Comisión estadounidense de Energía Atómica del que formé parte concluyó en 1974 que "por razones técnicas, puede descartarse la aceleración de protones polarizados en aceleradores (del tipo del AGS)".

Sucedió que logramos superar el problema de la despolarización. Pero presentó un obstáculo desesperante. Para alcanzar nuestra energía máxima de 22 GeV, debíamos hacer frente a las resonancias despolarizantes, que se desarrollan a 45 energías diferentes del ciclo de aceleración. Tener que navegar por el proceloso mar de las resonancias despolarizantes exigió de nosotros un esfuerzo titánico, que precisó del auxilio de unos instrumentos muy refinados, los polarímetros, para asegurar

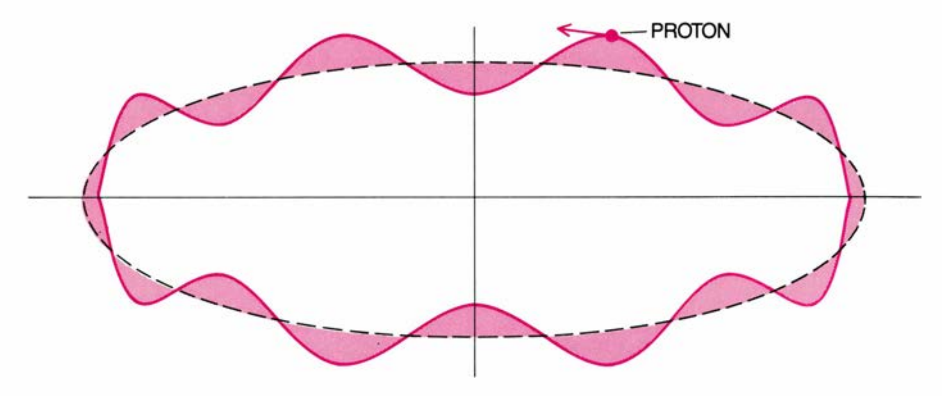
el porcentaje de protones que giraban en cada dirección. Este porcentaje nos permitía determinar si estábamos en el camino correcto cuando ajustábamos ciertos imanes especialmente diseñados. La "tripulación de la navegación resonante", que fue dirigida por Lazarus G. Ratner de Brookhaven y el autor de este artículo, trabajó el día entero durante seis semanas para superar los problemas de las 45 resonancias despolarizantes. En enero de 1986, después de dedicar seis años de intenso esfuerzo en toda la modificación, aceleramos un haz polarizado a 18,5 GeV, un nuevo record mundial. Los experimentos que utilizaban este instrumento único empezaron de inmediato; semanas más tarde alcanzamos los 22 GeV.

Para explicar por qué se desarrolla en un sincrotrón la despolarización y cómo se la supera, hemos de detenernos en el funcionamiento de la máquina. El sincrotrón, como su primo menor el ciclotrón, emplea, a la vez, campos eléctricos y magnéticos para acelerar los protones (que tienen carga eléctrica) hasta altas energías. Un campo magnético perpendicular al plano del anillo obliga a los protones a moverse en un círculo alrededor de un anillo en forma de rosquilla. Ese campo vertical curvante es una potente fuente de despolarización: si el eje del espín de un protón es horizontal, el campo puede girar el eje muchas veces, durante cada viaje alrededor del anillo, haciendo que resulte casi imposible mantener todos los ejes del espín alineados en un haz de protones.

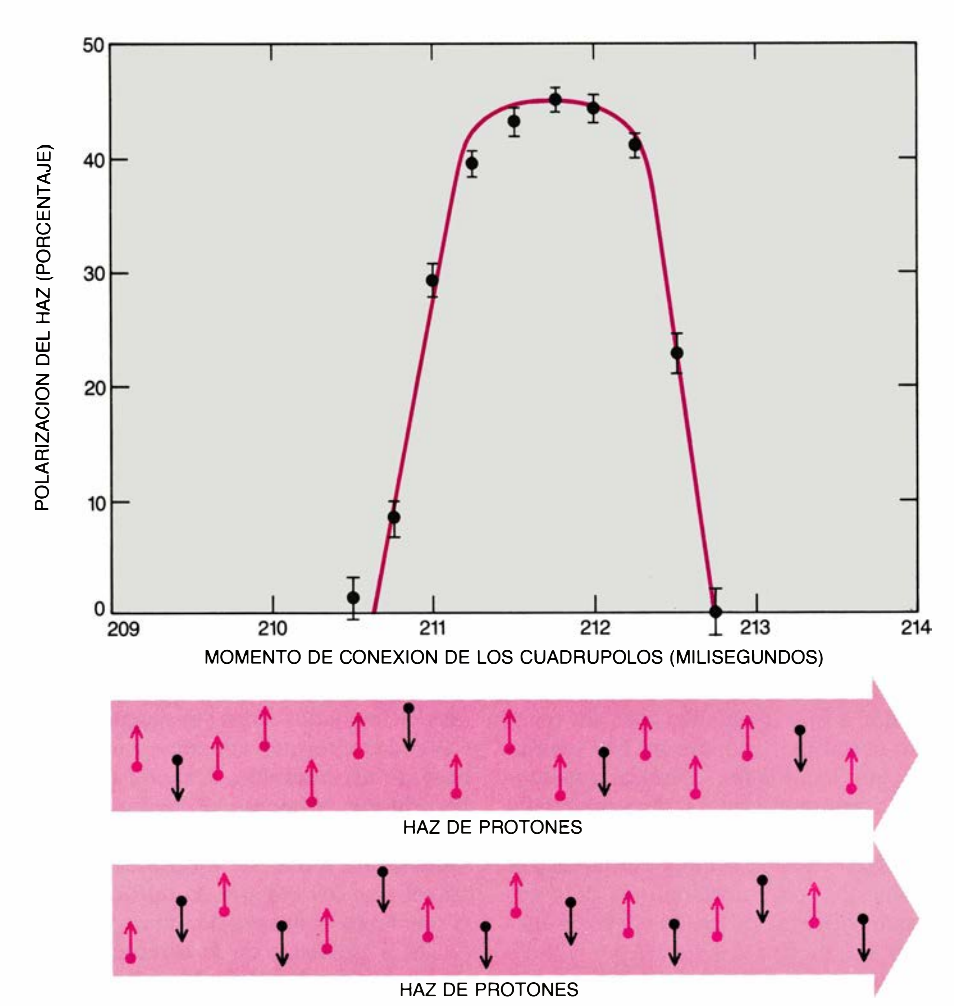
Cada vez que un protón recorre la rosquilla, recibe un voltaje de aceleración de unos 100.000 volt en una cavidad de aceleración. Durante el ciclo de aceleración del AGS, cada protón recorre la circunferencia de la rosquilla, de unos 800 metros, unas 200.000 veces ganando un total de unos 20 GeV al final del ciclo. En cada vuelta alrededor del anillo del AGS tarda unos 0,0000025 segundos (2,5 microsegundos); el ciclo completo viene a durar, pues, en torno al medio segundo.

Resulta difícil mantener los protones en el interior de la rosquilla a lo largo de todo el ciclo de aceleración, ya que cada partícula recorre unos 161.000 kilómetros dentro de un tubo que sólo tiene unos 76 milímetros de ancho. Hasta el tirador más fino encontraría difícil acertar un blanco de 76 milímetros desde una distancia de 161.000 kilómetros. Los físicos, que a menudo son cortos de vista, utilizan campos magnéticos especiales para focalizar los protones y evitar que se escapen. Los campos magnéticos focalizan las partículas cargadas como las lentes de una lupa focalizan los rayos luminosos.

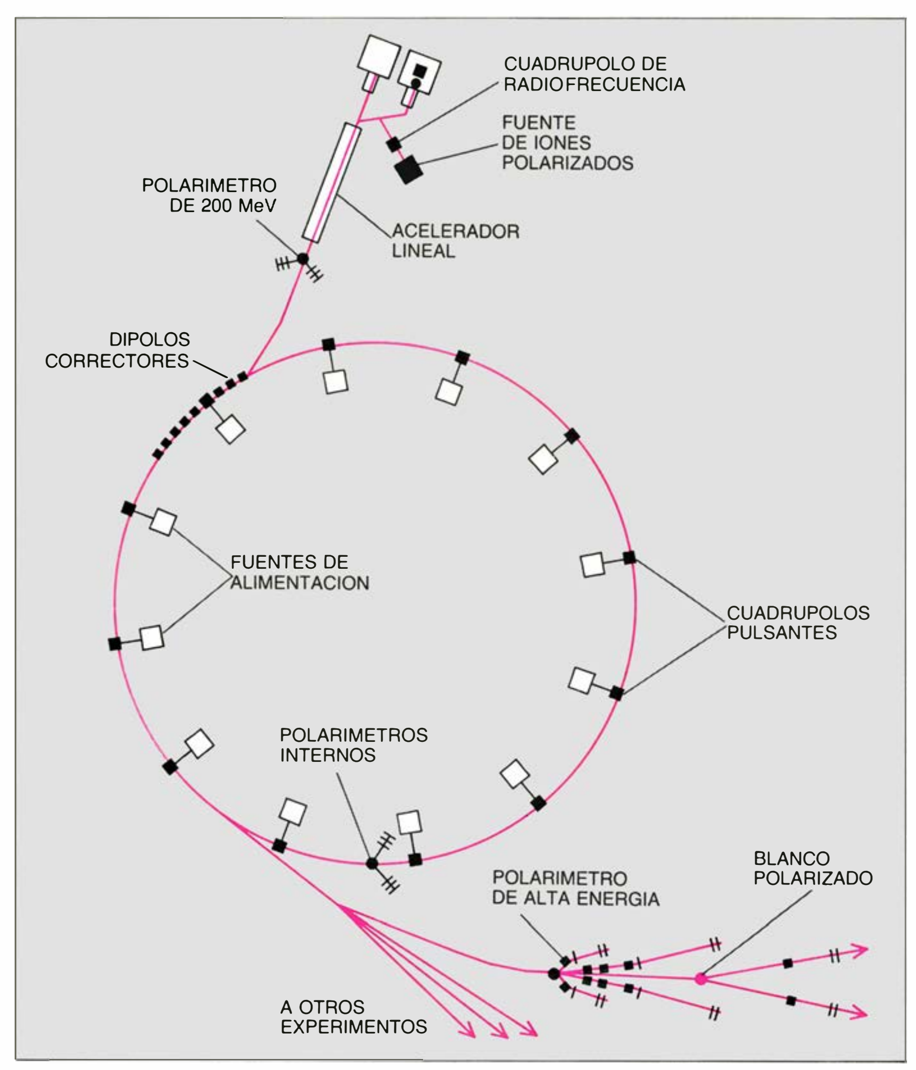
Los primeros sincrotrones de la estirpe del ZGS usaban campos magnéticos focalizadores bastante débiles y se les denominaba, en lógica consecuencia, sincrotrones de focalización débil. Por culpa de ésta, el haz de protones divergía y se hacía bastante grande; de ahí que la cámara de vacío en forma de rosquilla que contenía el haz necesitara



7. OSCILACIONES DE BETATRON VERTICALES en un haz de protones. Se trata de movimientos ondulatorios verticales causados por pares de cuadrupolos de focalización fuerte colocados en torno a un sincrotrón. Los movimientos ondulatorios van alejando los protones de las paredes de la cámara de vacío a medida que van recorriendo el anillo. Como las oscilaciones llevan a los protones a través de campos magnéticos horizontales, pueden destruir la polarización de un haz de protones, dejando a éstos girando al azar.



8. POLARIZACION DEL PROTON en el AGS; se mantiene conectando imanes cuadrupolares pulsantes especiales en instantes muy precisos del ciclo de aceleración. Obtuvimos polarizaciones cercanas al 50 por ciento (*arriba*): el 75 por ciento de los protones giraban en un sentido y el 25 por ciento en el sentido opuesto (*centro*). Sin un control de los tiempos de conexión de los cuadrupolos pulsantes, el porcentaje de la polarización se anula, es decir, en un sentido giraría el mismo número de protones que en el opuesto (*abajo*).



9. EL SINCROTRON DE GRADIENTE ALTERNANTE acelera protones polarizados hasta una energía de 22 miles de millones de electronvolt (GeV). Una fuente de iones polarizada provoca que la mayoría de los protones giren en una dirección. El cuadrupolo de radiofrecuencia (*véase la figura 1*) acelera los protones hasta 760 keV antes de introducirlos en un acelerador lineal, que los acelera, a su vez, hasta 200 millones de electronvolt (MeV). A su salida del acelerador lineal, se inyectan los protones en el anillo principal del sincrotrón. Los cuadrupolos pulsantes y los dipolos correctores compensan los dos tipos de problemas de despolarización. Durante el ciclo de aceleración la polarización se controla mediante los tres polarímetros.

una gran sección. La cámara de vacío del ZGS medía unos 76 centímetros de ancho por unos 15 centímetros de alto. Su gran tamaño ofrecía algunas ventajas; recuerdo haber introducido mi mano en la rosquilla, en 1965, para ayudar a fijar un blanco roto sin tener que desmontar el imán de 600 toneladas que lo rodeaba. Desgraciadamente, la enorme cámara de vacío tenía que estar rodeada por imanes aún mayores. El coste de semejantes imanes es prohibitivo para aceleradores de energías mayores. Los imanes del ZGS medían 2,5 metros de ancho por 1,4 de alto y pesaban 11 toneladas por pie lineal. La construcción empezó en 1955 y fue el último sincrotrón de focalización débil que se instaló.

Para mayores energías se necesitaba otro planteamiento mejor. En la década de 1950, Nicholas C. Christofilos, Ernest D. Courant, Stanley Livingston y Hartland S. Snyder inventaron el principio de focalización fuerte. Esta utiliza imanes cuadrupolares, cada uno de los cuales consta de dos polos norte magnéticos y dos polos sur magnéticos, colocados alternativamente en los vértices de un cuadrado. Cuando un haz de protones atraviesa el cuadrado, los protones que se alejan del eje del haz sienten una fuerza de focalización aún mayor que los empuja de nuevo hacia el eje. Lamentablemente, no es posible focalizar protones en la dirección horizontal ni en la vertical mediante un solo cuadrupolo. Si un cuadrupolo focaliza un haz de protones en una dirección, las partículas divergen en la otra dirección y se escapan de la cámara de vacío.

El secreto de la focalización fuerte estriba en colocar dos cuadrupolos opuestos en hilera. El primero focaliza el haz horizontalmente y lo hace diverger verticalmente, mientras que el segundo cuadrupolo lo focaliza verticalmente y lo hace diverger según la horizontal. A primera vista, podría pensarse que la focalización y la divergencia se cancelan entre sí dando un resultado nulo. La verdad es que el ajuste adecuado de las intensidades de los dos cuadrupolos permite focalizar un haz en ambas direcciones. Gracias al cabal funcionamiento de ese diseño, todos los aceleradores construidos desde 1960 emplean la focalización fuerte.

Los pares de imanes cuadrupolares determinan la oscilación de los protones en torno al eje central del anillo del sincrotrón formando ondas: las oscilaciones de betatrón. Las oscilaciones de betatrón verticales provocan que los protones viajen a través de campos magnéticos horizontales, que despolarizan a los protones que tienen un eje de espín vertical. Los campos son débiles, pero si el protón encuentra los suficientes, su espín puede girar. Cuantas más crestas y valles haya en las oscilaciones de betatrón, mayor será la frecuencia con que el protón cruzará un campo magnético horizontal en cada viaje alrededor del anillo.

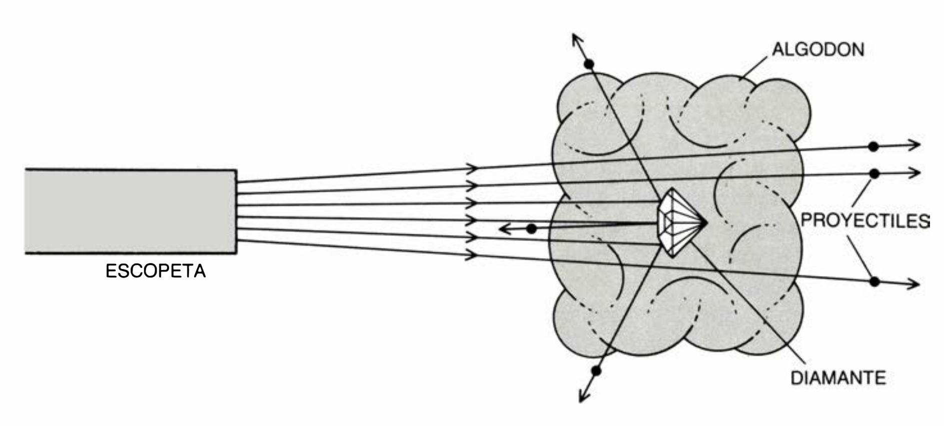
Afortunadamente, los problemas de despolarización asociados con las oscilaciones de betatrón y los campos magnéticos horizontales son mucho menores que el efecto de despolarización del campo desviador vertical en el caso de protones con un eje de espín horizontal. Mantener los espines alineados durante la aceleración resulta difícil, aunque no imposible cuando los protones giran en torno a un eje vertical.

Como he indicado antes, las resonancias despolarizantes constituyen los problemas de despolarización más serios. Se produce una resonancia despolarizante siempre que se igualan dos números cruciales. El primero es el número de rotaciones de espín que cada protón experimenta en un viaje en torno al anillo. El segundo es el número de veces que un protón oscila a través de un campo magnético horizontal durante cada circuito. En el AGS, un protón sufre unas nueve oscilaciones de betatrón por viaje a lo largo del anillo. Cuando los dos números se igualan, la polarización puede destruirse en menos de 10 microsegundos, que es el tiempo necesario para dar cuatro vueltas en torno al AGS.

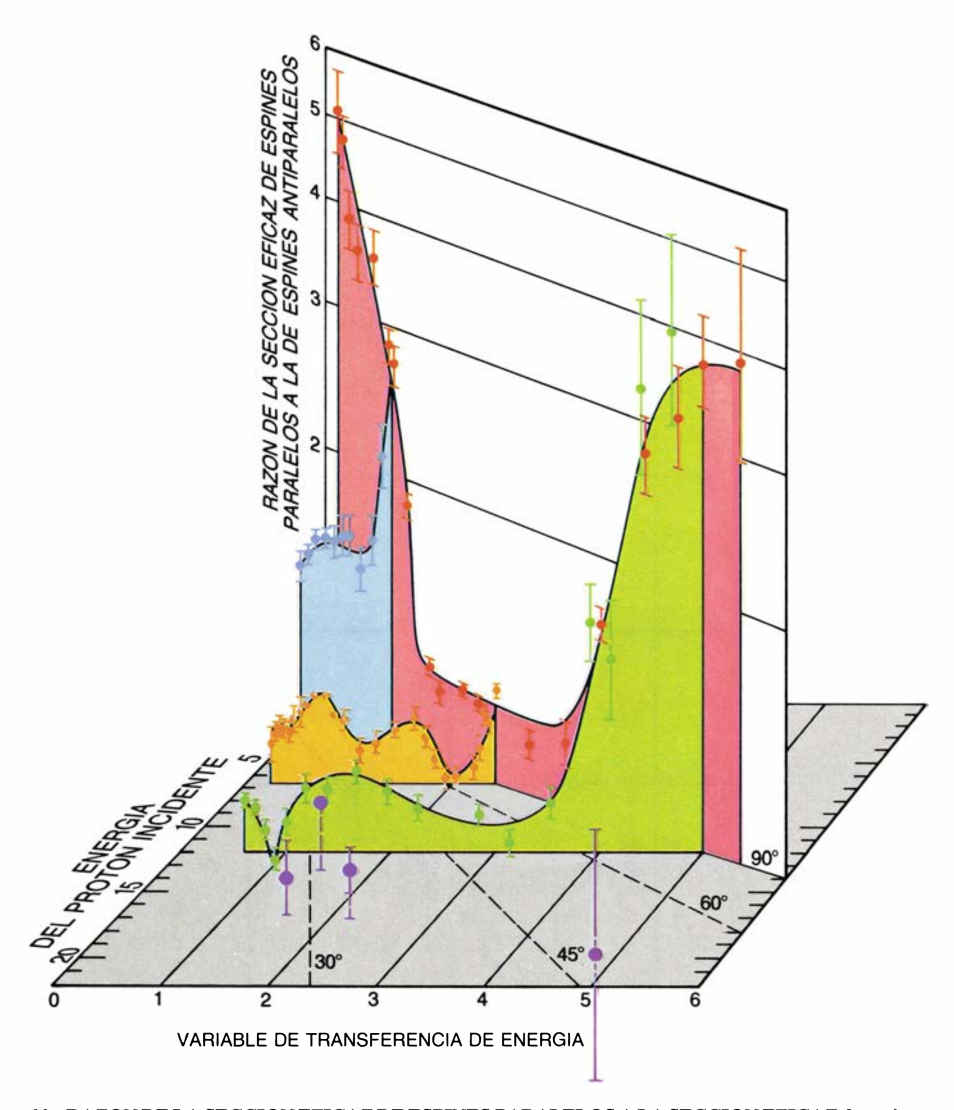
Para evitar que las resonancias se desarrollaran mientras se aceleraban protones, nos aprestamos a variar uno de los dos números en el instante en que se igualaban, y "saltarnos" así cada resonancia despolarizante. Decidimos alterar el número de veces que un protón encontraba un campo magnético horizontal, cambiando el número de crestas y valles de las oscilaciones de betatrón. Para ello, construimos imanes cuadrupolares pulsantes especiales que podían activarse en menos de 2,5 microsegundos. No tardamos en ver que, con hierro común, no podían construirse imanes con tan rápida respuesta. E intentamos probar con ferrita, una cerámica que contiene óxido de hierro. Un imán de ferrita puede generar campos magnéticos intensos en poco tiempo.

Los cuadrupolos pulsantes se construyeron en Michigan; en Brookhaven, sus grandes fuentes de suministro. La construcción de los cuadrupolos supuso todo un reto, por varias razones. La ferrita −con un precio en el mercado de 50 dólares por libra− debía cortarse en perfecta hipérbola; ahora bien, la dureza de la ferrita es tal que sólo puede tallarse con instrumentos de diamante; además, se estropea al menor recalentamiento durante el proceso de corte. Nuestro equipo de constructores, ingenieros, profesores y estudiantes resolvería esas dificultades recabando del Departamento de Energía de los EE UU la donación de 1,5 toneladas de ferrita sobrante y convenciendo a la Universidad de Michigan para que comprara una fresadora controlada por computador. Expertos en computadoras e hipérbolas trabajaron con mecánicos hábiles en el manejo de la fresadora y los talladores de diamante. Encima de la fresadora se instaló un "acuario" que mantenía la frágil ferrita sumergida en el agua para de ese modo asegurar una temperatura constante durante el corte. El esfuerzo valió la pena y, en 1983, se montaron en el AGS 12 imanes cuadrupolares pulsantes.

Cada imán cuadrupolar genera un campo magnético a partir de cero en sólo 1,6 microsegundos. Para obtener respuesta tan rápida el imán precisa una fuente de alimentación grande y compleja que produce una corriente eléctrica de 1500 ampère a 15.000 volt: una potencia de 22,5 megawatt. Afortunadamente, durante el funcionamiento del acelerador la potencia máxima combinada de todos los cuadrupolos –más de 200 megawatt– sólo se alcanza unos microsegundos cada se-



10. EXPERIMENTOS DE COLISION para analizar la estructura del protón. Recuerdan el procedimiento del inspector de aduanas en su rastreo de un diamante escondido en una gran bala de algodón. El inspector dispara con una escopeta contra el algodón y observa cuántos proyectiles se dispersan en cada dirección. La bala de algodón grande y suave sólo desvía ligeramente los proyectiles. Pero el pequeño diamante, duro, repele, hacia el inspector, algunos proyectiles. Contando cuántos proyectiles se dispersan en cada dirección, el inspector puede (con las leyes de la geometría) determinar la forma y el tamaño exactos del diamante. Al analizar la estructura del protón, los investigadores del AGS utilizan los propios protones como "proyectiles".



11. RAZON DE LA SECCION EFICAZ DE ESPINES PARALELOS A LA SECCION EFICAZ de espines antiparalelos en las colisiones de protones. Dicha razón oscila conforme van cambiando las características de la colisión. Los dos ejes inferiores de esta gráfica tridimensional corresponden a la energía de los protones del haz incidente y a la transferencia de energía durante la colisión. La variable transferencia de energía aumenta con el ángulo de colisión, del que se indican algunos valores. La curva roja representa los datos de pruebas en las que el ángulo de colisión medido resultó ser exactamente de 90 grados. Las curvas azul, naranja y verde corresponden a pruebas en las que la energía de los protones incidentes se fijó en 3, 6 y 12 GeV, respectivamente. Los lunares de color púrpura representan datos a mayores energías del AGS. Las oscilaciones observadas no se reconcilian bien con las predicciones que establece la cromodinámica cuántica.

gundo, de manera que la potencia media viene a ser de 1 kilowatt. Tras mucho trabajo y ahínco, un equipo de ingenieros y técnicos de Brookhaven crearon esa fuente refinada de alimentación. Cada fuente, de la magnitud de un camión, alimenta a un cuadrupolo, que tiene el tamaño aproximado de una lámpara de mesa.

Para asegurar que los cuadrupolos pulsantes se conectaran en el momento preciso en que los protones alcanzasen cada resonancia despolarizante, realizóse un repaso a fondo del computador de control del AGS. El ordenador controla la energía exacta de los protones durante cada microsegundo del ciclo de aceleración. Para un control apropiado de los protones polarizados, los expertos encargados del computador del AGS tuvieron que mejorar la precisión del control en un factor cercano a 10. Esa proeza trajo consigo un beneficio adicional: convertir el AGS en un acelerador más preciso para protones no polarizados. Ahora bien, ni siquiera tal refinamiento bastaba para saber el instante preciso en que los protones encontrarían una resonancia despolarizante. Para los ajustes finales recurrimos a una herramienta fundamental en la ciencia: la observación experimental.

Tanto esfuerzo mental, físico y financiero —del que sólo he descrito una parte— se vio premiado, para nuestra satisfacción, con la aceleración de protones dotados de espín hasta 18,5 GeV. La polarización máxima se acercó al 50 por ciento, lo que significaba que el 75 por ciento de los protones giraba en un sentido y el 25 por ciento en el opuesto. El AGS estaba acelerando unos 20.000 millones de protones polarizados cada 2,4 segundos.

Abandonamos entonces el dominio de los físicos de aceleradores para introducirnos en el de los físicos experimentales de altas energías con el propósito de hallar, por fin, la respuesta a la cuestión clave: la razón de la sección eficaz de espines paralelos a la sección eficaz de espines antiparalelos, ¿aumenta, disminuye o por alguna razón misteriosa permanece fija en el valor cuatro a medida que la energía de la colisión se eleva por encima de los 13 GeV? Para nuestra desgracia, el número de protones desviados a 90 grados disminuye mucho a energías más altas; en ángulos menores se dispersan más protones. Ante esa situación, nuestro equipo experimental de Brookhaven, el Instituto de Tecnología de Massachusetts, el Instituto Federal Suizo de Tecnología y las universidades de Michigan, Nôtre Dame y Texas A&M comenzó su estudio por los ángulos de dispersión menores que tenían ritmos de contaje más elevados.

Nos encontramos con otra sorpresa. A 18,5 GeV la razón de la sección eficaz de espines paralelos a la sección eficaz de espines antiparalelos resultaba muy próxima a la unidad en el caso de colisiones violentas en ángulos de colisión mucho menores que 90 grados. La gráfica construida basándonos en los nuevos datos sugería que la razón podía oscilar arriba y abajo conforme las colisiones fueran más energéticas y más violentas. Nicolai Tyurin, del Instituto Serpukhov, y otros teóricos que habían predicho tales oscilaciones deben hallarse agradecidos con esta posible confirmación de su trabajo.

Pero ocurre que la gráfica podría revelar algo distinto. Concretamente, en el caso de dos partículas idénticas (dos protones), los 90 grados pueden constituir un ángulo de colisión especial en el que se ven efectos únicos. La importancia de los 90 grados en estos experimentos de espín fue destacada en 1978 por Hans A. Bethe, de la Universidad de Cornell, y Victor F. Weisskopf, del MIT. Nuestros nuevos resultados sobre colisiones violentas lejos de los 90 grados pueden interpretarse como una comprobación de la sugerencia de Bethe y Weisskopf. Aunque la razón de la sección eficaz de espines paralelos a la sección eficaz de espines antiparalelos varía drásticamente con la energía de los protones incidentes, a cada energía la razón máxima siempre tiene lugar a 90 grados. Harry Lipkin, del Instituto Weizmann de Israel, y otros han propuesto hace poco modelos específicos en los que la proximidad de los 90 grados puede elevar notablemente el valor de la razón. Futuros experimentos del AGS a 90 grados podrían determinar qué teoría es la correcta.

El misterio crecía, pues, cuando se trataba de energías aún mayores del AGS. ¿Se ha confirmado la predicción de la QCD de que los efectos de espín desaparecerían a altas energías? Otro nuevo resultado, a 28 GeV, me induce a pensar que no es así. Dimos con el

RAZON DE PROTONES DISPERSADOS HACIA LA IZQUIERDA Y HACIA LA DERECHA
1.86
1.50
1.22
1
.82
0 2 4 6 8
VARIABLE DE TRANSFERENCIA DE ENERGIA

12. ASIMETRIA IZQUIERDA-DERECHA de las colisiones a una energía todavía mayor, de 28 GeV. Presenta una nueva dificultad para la QCD. Con un blanco de protones polarizados se dispersó un haz de protones no polarizados. El número de protones dispersados hacia la izquierda superó, en aproximadamente dos tercios, el número de protones dispersados hacia la derecha. Según la QCD, deben dispersarse igual número de protones hacia la izquierda que hacia la derecha. (Si el blanco no hubiera estado polarizado, las cifras hubieran sido iguales.) Los puntos de color son datos obtenidos a una energía de 24 GeV en el CERN.

resultado en cuestión mientras preparábamos nuestro equipo para el experimento con el haz polarizado. Calibramos los instrumentos observando la colisión elástica del haz de protones del AGS normal, no polarizado, con nuestro blanco de protones polarizado. Según la QCD, el número de protones que se dispersan hacia la izquierda debe ser igual al número de protones que lo hacen hacia la derecha. La predicción se confirma en ángulos de colisión pequeños. Recuerdo haber pensado que, aun cuando la QCD no explicara nuestros primeros resultados del ZGS, sería correcta, a buen seguro, para la colisión izquierda-derecha de un haz no polarizado sobre un blanco polarizado.

Realizamos el experimento a finales de 1983; para entonces, mejoras recientes en nuestro blanco de protones polarizados nos permitieron emplear un haz de casi 100.000 millones de protones en cada ciclo manteniendo los espines de los protones del blanco alineados. Había unas 100 veces más protones que los que habíanse dispersado previamente por el blanco polarizado; pudimos estudiar, por tanto, las colisiones más violentas menos frecuentes. Fue entonces cuando empezaron a aparecer nuevas sorpresas. En colisiones violentas de ángulos grandes a 28 GeV se dispersaban a la izquierda dos terceras partes más de protones que a la derecha.

Nuestros datos estadísticos escaseaban en un comienzo. Como el tiempo de experimentación que nos habían aprobado para el experimento había expirado, solicitamos una prórroga. El comité asesor del programa del AGS votó la denegación de la petición: quizá los teóricos del comité creyeron que sólo habíamos observado una anomalía estadística y que la obtención de más datos se limitaría a confirmar la predicción de la QCD según la cual se dispersa a la derecha el mismo número de protones que a la izquierda. El director adjunto de Brookhaven, Robert B. Palmer, tomó la insólita decisión de desoír al comité. Cuando, más tarde, confirmamos que la colisión dependía del sentido, respiraría satisfecho.

¿Qué significa la diferencia observada entre la colisión hacia la izquierda y hacia la derecha? Quizá, así lo sugirieron algunos teóricos, la violencia y la energía (28 GeV) de nuestra colisión eran excesivamente bajas para que le resultara aplicable una teoría tan fundamental como la QCD. Tal vez se exploren pronto energías más altas. Puede que no tarde en medirse la diferencia de colisiones hacia la izquierda y hacia la derecha desde 70 hasta 800 GeV en los sincrotrones de protones de Serpukhov, el CERN y Fermilab. El supercolisionador superconductor de 20 TeV (20.000 GeV) propuesto, el SSC, posibilitará otro incremento, enorme, de energía [véase "El supercolisionador superconductor", por J. David Jackson, Maury Tigner y Stanley Wojcicki; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1986]. Parece difícil, sin embargo, aumentar la violencia de las colisiones elásticas en un factor sustancial; a medida que las colisiones adquieren mayor violencia, escasea su número. Aunque yo tengo paciencia, soy reacio a abordar un experimento que sólo produce un suceso cada 100 años. Mis estudiantes, que necesitan tales sucesos para una tesis de doctorado, son todavía más refractarios.

No parece probable que se investiguen en lo que queda de siglo las colisiones elásticas a las energías y a las transferencias de energía, enormes, que se precisan para comprobar la QCD. Quizá valga la pena buscar una teoría nueva y más útil de las interacciones entre los protones dotados de espín y sus constituyentes también con espín. Conocemos mejor las fuerzas eléctricas, débiles y gravitacionales que la fuerza fuerte (nuclear) que liga los quarks, los protones y los neutrones. Quizá la razón estribe en que la interacción nuclear sea tan fuerte que la técnica teórica de aproximación, la teoría de perturbaciones, no sirva. Además, la propia intensidad de la interacción fuerte la sitúa por encima de las tres restantes.

Cuanto más analizo nuestros datos, tanto más me inclino a pensar que encierran algún mensaje sencillo, todavía por descifrar, acerca de los constituyentes de los protones. No me imagino qué pueda suceder luego, pues siempre hubo, detrás de los experimentos de polarización realizados para analizar regiones inexploradas, nuevas sorpresas. Entre éstas, la gran polarización de las partículas lambda producidas en colisiones violentas protón-protón y los enormes efectos de espín observados en colisiones de baja energía protón-protón. Milito en el campo de la física experimental, que sólo reconoce por juez último de la verdad científica la observación. Quizá las mediciones de un futuro próximo aporten alguna clave mediante la cual un joven teórico brillante desentrañe los constituyentes del protón y sus interacciones fuertes.

Las causas del síndrome de Down

Parecen haberse identificado y localizado en el cromosoma 21, genes responsables de muchas de las alteraciones asociadas con esa patología

David Patterson

El síndrome de Down es una condición genética que puede tener consecuencias devastadoras. La causa más frecuente de retraso mental en Occidente, afecta a uno de cada 700 nacidos vivos; los niños que vienen al mundo con dicha alteración sufren un abanico entero de problemas físicos y mentales, muchos de ellos graves. Además, según se cree, los genes implicados en algunos de los síntomas del síndrome de Down son los mismos que, si se alteran o se controlan inadecuadamente, pueden producir diversos trastornos clínicos, en particular leucemia y la enfermedad de Alzheimer, en individuos por lo demás sanos. Por esas razones, es objeto de una intensa investigación que, previsiblemente, aportará gran información acerca de la expresión genética y las bases moleculares de la enfermedad.

El síndrome de Down no es una enfermedad reciente. Prueba su antigüedad, por ejemplo, un cráneo sajón del siglo IX cuyas dimensiones coinciden con las del de un paciente típico actual, así como una serie de interpretaciones artísticas que datan del siglo XV y en las que aparecen niños de rasgos faciales característicos del síndrome.

Sin embargo, el síndrome no se reconoció formalmente hasta 1866. Ese año, John Langdon Down, médico del Asilo de Earlswood, Surrey, Inglaterra, publicó la primera descripción global de la enfermedad. Su informe se basaba en la observación de que ciertos pacientes con retraso mental mostraban una peculiar constelación de síntomas físicos: marcado pliegue epicántico de los ojos, rasgos faciales aplanados, pliegues anormales en las manos, flaccidez muscular y corta estatura corporal.

Se sabe actualmente que los sujetos con síndrome de Down están afectados por una amplia gama de anomalías, de índole anatómica y bioquímica. Un 40 por ciento nace con alteraciones cardiacas congénitas, la mayoría tiene el cerebro pequeño y muchos presentan un riesgo elevado de desarrollar cataratas u otros transtornos visuales relacionados con defectos de los cristalinos. Asimismo, presentan elevados los niveles de purinas (dos de las bases nitrogenadas que forman parte del ADN y ARN), circunstancia que, por sí sola, puede causar defectos neurológicos, retraso mental y deficiencias del sistema inmunitario. Entre las complicaciones adicionales se cuentan el incremento de la susceptibilidad a las infecciones y un aumento de entre 20 y 50 veces del riesgo de padecer leucemia.

No sorprende, por tanto, que el promedio de vida de los individuos afectos del síndrome sea inferior al normal. En 1929 se estimaba que su esperanza de vida era de sólo 9 años. En 1980 los adelantos de la atención médica han aumentado su perspectivas de vida hasta más de los 30 años y actualmente el 25 por ciento de ellos alcanza la edad de 50 años.

A medida que aumenta la edad promedio de los individuos con síndrome de Down, se hacen patentes otras características de la enfermedad. En las últimas décadas, el estudio del material de autopsia ha demostrado que todos los individuos con síndrome de Down que superan la edad de 35 años desarrollan en el cerebro el mismo tipo de placas seniles y de nudos neurofibrilares microscópicos anormales que las personas que mueren por la enfermedad de Alzheimer, la forma más frecuente de demencia presenil. Del mismo modo, los sujetos con síndrome de Down parecen presentar un riesgo significativamente aumentado de desarrollar los síntomas cognitivos de la enfermedad de Alzheimer.

Durante muchos años, el síndrome fue una enfermedad de origen desconocido, con una incidencia verosímilmente aleatoria. Se propusieron muchas teorías, entre ellas las que asociaban la aparición infantil del síndrome a malformaciones de las glándulas endocrinas, o a que los progenitores padecieran tuberculosis o sífilis. En 1909, G. E. Shuttleworth, del Asilo Royal Albert, de Lancaster, Inglaterra, sugería que la enfermedad era una consecuencia del "agotamiento uterino". Basaba su teoría en la observación de que un número importante de los niños con síndrome de Down eran los últimos vástagos de familias numerosas. En parte, Shuttleworth tenía razón: con frecuencia, los niños con síndrome de Down son los últimos de una larga serie de hijos, circunstancia que hoy se relaciona con que la madre haya alcanzado una edad avanzada y no con el número de hijos que haya alumbrado.

A principios de la década de 1930, Adrian Bleyer, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington en St. Louis, y P. J. Waardenburg sugirieron, por separado, que el síndrome de Down podía estar relacionado con la no disyunción, es decir, el fracaso de la separación de los cromosomas durante la meiosis (el proceso de división celular que culmina con la formación de óvulos y espermatozoides). Tal suposición resultó de la observación del comportamiento de los cromosomas de la planta llamada primavera tardía, en la que, cuando la separación los cromosomas es incorrecta, aparecen individuos estériles con 15 cromosomas en lugar de los 14 normales. Ya que produce anomalías en la primavera, ¿podría la no disyunción causar las alteraciones asociadas con el síndrome de Down? Los esfuerzos para comprobar esa hipótesis fracasaron, pues no se había logrado aún determi-

nar el número de cromosomas del hombre.

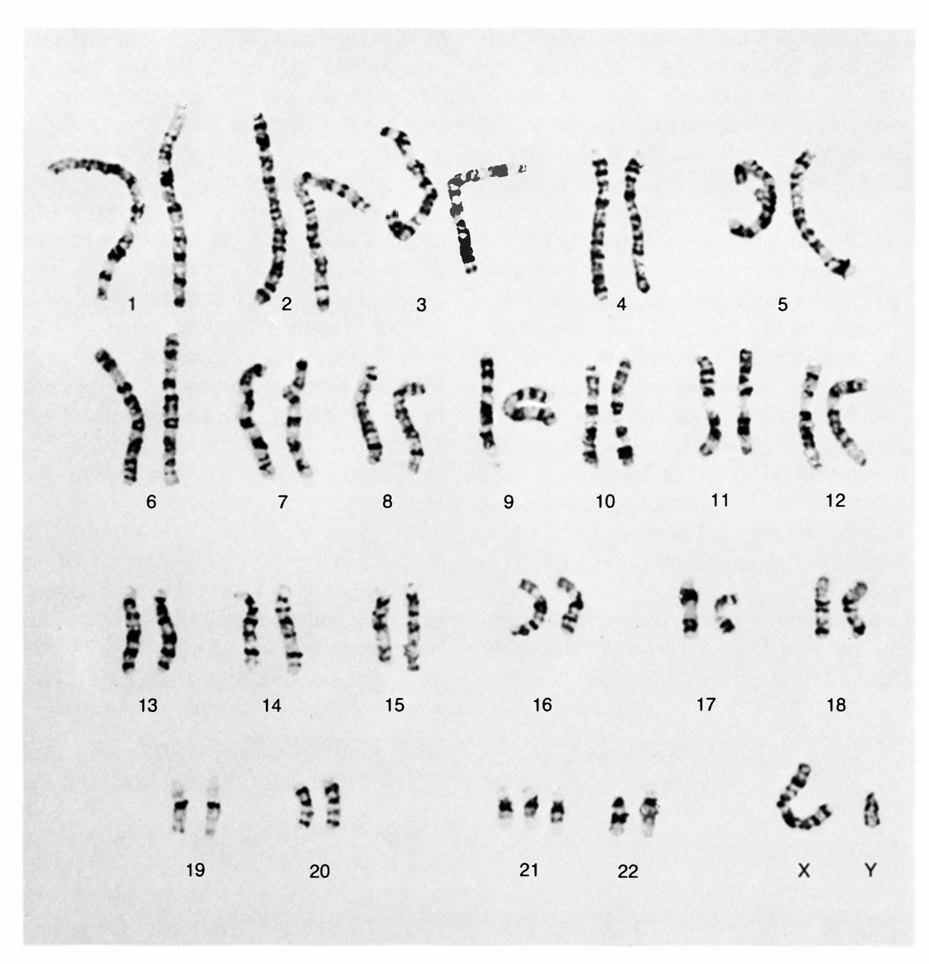
En la década de 1950, Joe Hin Tjio y Albert Levan, del Instituto Genético de Lund, Suecia, determinaron que el número cromosómico del hombre era 46, y se verificó la relación entre el síndrome de Down y la no disyunción. Jérôme Lejeune, Marthe Gautier y Raymond Turpin, del Instituto de Progénesis de Paris, contaron los cromosomas de las células de los enfermos con síndrome de Down. Observaron que, por norma, los pacientes habían sufrido una no disyunción en sus cromosomas: las células de todos ellos presentaban tres copias del cromosoma 21, en lugar de dos, contabilizándose un total de 47 cromosomas en lugar de 46.

La no disyunción cromosómica refleja una alteración en la división celular. Con frecuencia acarrea graves consecuencias, independientemente de los cromosomas que se hayan visto involucrados. En la no disyunción, los cromosomas emparejados, que durante la meiosis normal se separan hacia las células hijas, no se dividen adecuadamente, y así una célula hija recibe dos cromosomas y la otra ninguno. Las células a las que les falta un cromosoma suelen morir; las que tienen dos reciben una tercera copia durante la fecundación y aparece la trisomía. Los fetos trisómicos rara vez sobreviven; los que lo logran sufren múltiples alteraciones bioquímicas y físicas. La trisomía del cromosoma 21, es decir, el síndrome de Down, constituye, con mucho, la más frecuente en los humanos nacidos vivos, en parte quizá porque en el hombre el cromosoma 21 es el de menor tamaño.

Se ha demostrado inequívocamente que para la aparición del síndrome de Down resulta imprescindible la trisomía, cuando menos parcial, del cromosoma 21. No existen sujetos con los síntomas clínicos del síndrome que no presenten trisomía, siquiera parcial, del cromosoma 21; y viceversa, no se conocen casos de individuos con trisomía 21 que no padezcan síndrome. La alteración no siempre deriva de una no disyunción; alrededor del 5 por ciento de los pacientes con síndrome de Down portan una traslocación, un tipo diferente de mutación genética en la que sólo parte del cromosoma 21 se presenta por triplicado. Así sucede cuando un fragmento del cromosoma 21 se adhiere a otro cromosoma, con mayor frecuencia a los cromosomas 13, 14, 15, 21 o 22. En estas circunstancias, durante la meiosis surgen problemas de emparejamiento y el fragmento del cromosoma 21 aparece en una de las células hijas junto con un cromosoma 21 normal; igual que ocurre en la no disyun-



1. NIÑA CON SINDROME DE DOWN, en la que se advierten los rasgos físicos característicos de dicha alteración: pliegues epicánticos de los párpados, cara ancha y nariz aplanada. La niña, de cuatro años de edad, se ha beneficiado notablemente de que su familia le haya prestado una atención activa y entusiasta. A las cuatro semanas de edad se inició su terapia; apenas cumplido el año comenzó la terapia de lenguaje. Su desarrollo físico e intelectual ha ganado muchísimo con ello. Gracias a la continuada terapia física y de su actividad, apenas muestra algunos rasgos típicos del síndrome de Down, como el mantener la boca abierta con la lengua fuera o una postura relajada, relacionados con la debilidad del tono muscular. Muchos llegan a alcanzar cierto grado de independencia.



2. CARIOTIPO, exposición del complemento cromosómico de un organismo. Los cromosomas se recortan de una microfotografía aumentada obtenida durante la metafase; se agrupan y se alinean en parejas de homólogos. La técnica permite el recuento exacto de los cromosomas, así como detectar defectos de gran magnitud. En condiciones normales, los seres humanos portan 46 cromosomas (23 pares), aunque ese número puede variar por efecto de una no disyunción. En esta imagen, la presencia de tres copias del cromosoma 21 indica que el poseedor del cariotipo padece el síndrome de Down. (Imagen del Hospital Infantil de Denver.)

ción, la fecundación deja al fragmento en trisomía. Según han demostrado estudios clínicos efectuados en un pequeño grupo de pacientes con síndrome de Down causado por traslocación, basta la trisomía del tercio terminal del cromosoma 21 para producir la enfermedad.

El cromosoma 21 contiene sólo 45 millones de pares de bases de ADN (del total de 3000 millones que hay en el núcleo de las células humanas), lo que equivale al 1,5 por ciento del material genético. Se calcula que el ser humano posee alrededor de 100.000 genes funcionales. Suponiendo una proporción similar de genes para una cantidad dada de ADN, el cromosoma 21 poseería unos 1500 genes, de los que se han identificado menos de 20.

Los cromosomas están formados por dos mitades idénticas, denominadas cromátidas hermanas, que se unen en la región denominada centrómero. El brazo corto del cromosoma, que se extiende por encima del centrómero, se conoce por región p; el brazo largo, por debajo del centrómero, es la región q. Exponiendo los cromosomas a determinados colorantes químicos se visualizan bandas alternativamente claras y oscuras. Se localizan las bandas por su posición en la región p o q del cromosoma y asignándoles números que reflejan su distancia al centrómero; cuanto más lejana se encuentra la banda, más alto es el número. La anchura de las bandas no es uniforme, configurándose un patrón característico en cada cromosoma. Por ejemplo, el gen que codifica las enzimas necesarias para la síntesis de las purinas se aloja en la banda q22.1 del cromosoma 21; se localiza así el cromosoma con toda exactitud en una banda de la mitad inferior del brazo q. Las bandas cromosómicas humanas más pequeñas reconocibles al microscopio contienen de dos a cinco millones de pares de bases de ADN y, por tanto, pueden alojar muchos genes.

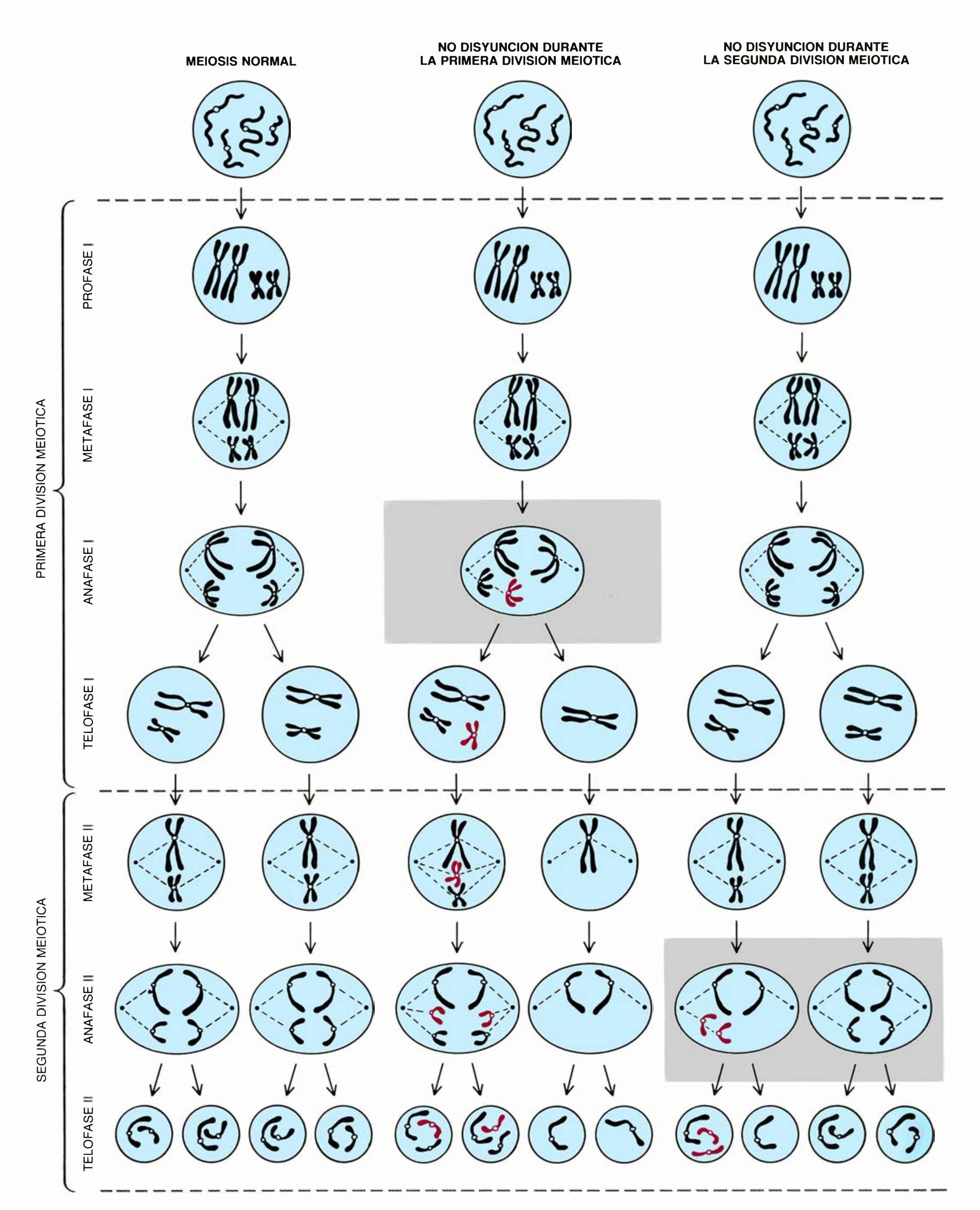
En el estudio del cromosoma 21 se han planteado cuatro cuestiones: ¿qué genes ocupan la región del cromosoma responsable específicamente del síndrome de Down? ¿A cuáles de esos genes puede atribuirse la patogenia del síndrome? ¿Qué proteínas determinan exactamente esos genes? ¿Cuál es el mecanismo por cuya virtud la presencia de tres copias de los genes (en lugar de las dos normales) conduce a la aparición del síndrome de Down?

Para responder a esas preguntas es necesario localizar e identificar los genes presentes en el cromosoma 21, es decir, debe trazarse su mapa genético. Los mapas genéticos de alta resolución sitúan los genes en regiones concretas del cromosoma y, en última instancia, en fragmentos específicos de ADN, por lo que proporcionan la máxima información.

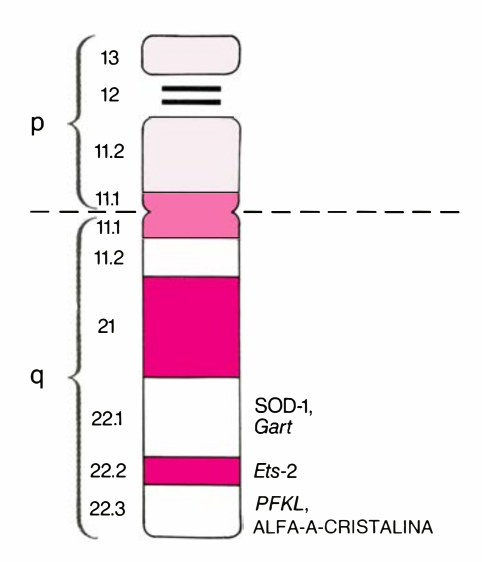
Por regla general, la obtención de esos mapas requiere varios pasos, en los que se combina la información que rinden técnicas citogenéticas y bioquímicas. A veces puede localizarse un gen en un cromosoma de modo indirecto, por análisis bioquímico basado en el efecto gen-dosis. El fundamento teórico del método es sencillo: puesto que los individuos trisómicos poseen tres copias de cada gen en lugar de dos, deben producir un 50 por ciento más del producto específico del gen que los individuos normales. Por tanto, la presencia, en un paciente, de niveles equivalentes a una vez y media los normales de alguna proteína, o de la actividad de determinada enzima, constituye un buen indicador de que algún gen del cromosoma trisómico determina esa proteína o enzima.

El método resulta especialmente útil en casos de trisomía parcial, cuando el aumento de expresividad puede relacionarse con una región estrecha del cromosoma. En ciertas circunstancias, el método permite localizar un gen en una banda determinada del cromosoma. No obstante, no siempre resulta exacto relacionar el producto de un gen con la presencia de un cromosoma de más; y ello porque los niveles de los productos génicos varían entre individuos y entre tejidos y porque las copias de un gen pueden diferir en su actividad. La reacción de autorregulación denominada compensación de la dosis modera el aumento de producción proteica. Por consiguiente, siempre que se pueda debe confirmarse por otros métodos la localización de un gen identificado mediante el efecto gen-dosis.

Otra importante técnica de localización emplea marcadores genéticos, variantes genéticas expresadas en la composición de la proteína o en la aparien-



3. MEIOSIS NORMAL (*izquierda*), de la que se obtienen óvulos y espermatozoides haploides, es decir, con la mitad de cromosomas que las otras células. Durante la primera división meiótica, las parejas de cromosomas homólogos intercambian información genética (en la profase) y se separan hacia zonas opuestas de la célula (anafase), tras lo cual la célula progenitora se divide (telofase). El proceso se repite en la segunda división meiótica, pero en ésta se separan las dos cromátidas hermanas y cada célula se divide de nuevo para formar cuatro células hijas. Se produce la no disyunción cuando los cromosomas no se separan durante la anafase de la primera división meiótica (*centro*) o de la segunda división meiótica (*derecha*). En circunstancias normales, el huso arrastra a los cromosomas hacia zonas opuestas de la célula, pero cuando no se da disyunción un par de cromosomas homólogos (durante la primera división meiótica) o las dos cromátidas hermanas (durante la segunda) son arrastrados hacia el mismo lado. Las cuatro células hijas reciben entonces un número anormal de cromosomas. Si la no disyunción afecta al cromosoma 21, los individuos que nacen con tres copias de dicho cromosoma padecen el síndrome de Down.



4. CINCO GENES cuya trisomía probablemente está relacionada con el síndrome de Down se han localizado en una estrecha región del brazo largo, o q, del cromosoma 21. Los genes que determinan las proteínas superóxido dismutasa (SOD-1) y alfa-A-cristalina se localizan, respectivamente, en las bandas q22.1 y q22.3; los genes *Gart* y *ets*-2 se encuentran en las bandas q22.1 y q22.2. Asimismo se ha localizado en la banda q22.3 un gen que determina la fosfofructocinasa, una enzima del hígado.

cia física del genotipo que pueden seguirse de generación en generación. Si un marcador genético del que se sabe que está determinado por ADN del cromosoma 21 aparece casi siempre asociado a otro rasgo fenotípico, cabe suponer que ese segundo rasgo se encuentra también en el cromosoma 21. Tras la localización de ambos genes en el mismo cromosoma, puede deducirse la distancia relativa que les separa determinando con qué frecuencia se separan durante la meiosis cuando los cromosomas hermanos intercambian fragmentos en el transcurso de la recombinación genética. Los genes que están ligados (es decir, que por norma se heredan juntos) probablemente ocupan posiciones muy próximas en el mismo cromosoma; los genes que no están ligados (aquellos que suelen moverse de modo independiente durante la recombinación) suelen ocupar posiciones muy alejadas en el cromosoma o se encuentran en cromosomas distintos. Por tanto, la frecuencia de recombinación sirve de medida de la distancia entre los genes.

Ha empezado a utilizarse recientemente una nueva y poderosa herramienta para localizar genes: el polimorfismo de la longitud de los fragmentos de restricción (PLFR), que también constituye un marcador genético. Los fragmentos de restricción son segmentos de ADN escindidos por las endonucleasas de restricción; cada una de estas enzimas reconoce secuencias diana específicas en un filamento de ADN y, consecuentemente, escinden el ADN sólo en esos puntos. Las mutaciones que sufra el ADN pueden alterar el patrón de puntos de escisión, obteniéndose fragmentos de longitudes diferentes de las habituales. Esas modificaciones de la longitud, o PLFR, permiten detectar diferencias en regiones identificables del filamento de ADN. Los PLFR no siempre se dan en regiones que codifican genes, pero, en cualquier caso, constituyen marcadores altamente fiables, a los que pueden asociarse genes u otros marcadores genéticos. El método se ha aplicado extensamente en la localización de genes y secuencias de ADN del cromosoma 21.

La capacidad de aislar genes específicos, o secuencias de ADN, ha brindado una técnica nueva: la hibridación in situ. Se aíslan secuencias específicas de ADN, se marcan con un isótopo radiactivo y se utilizan para sondear una preparación de cromosomas de otro individuo u otras especies. Las secuencias marcadas detectan, en los cromosomas, filamentos de ADN complementarios a ellas y se les unen. Exponiendo la preparación de cromosomas a una emulsión fotográfica se determina con exactitud dónde se han unido las secuencias radiactivas a los cromosomas intactos. La técnica permite una resolución relativamente alta: se pueden localizar fragmentos de ADN en un tercio del cromosoma 21.

En los últimos años, el desarrollo de una poderosa técnica de localización, la denominada hibridación interespecífica de células somáticas, ha revolucionado también el campo de la genética molecular. Los genetistas han desarrollado técnicas de fusión de células humanas con células de roedores (generalmente de ratón o de hámster chino) con las que obtienen híbridos que portan los cromosomas de ambas especies. Por razones que se desconocen, esas células híbridas pierden la mayoría de los cromosomas humanos, mientras que se conservan los cromosomas del roedor. Ello permite obtener una célula híbrida en la que la representación humana se limite a un único cromosoma. Puesto que el cromosoma humano presente en el híbrido es funcional (cuando menos en parte), a menudo pueden distinguirse los productos proteicos que codifica y diferenciarlos de los determinados por los cromosomas del roedor.

Francis H. Ruddle y sus colaboradores, de la Universidad de Yale, lograron desarrollar por primera vez un híbrido de ese tipo que contenía sólo el cromosoma humano 21 y cromosomas procedentes de una línea especial de células de ratón denominada A9. Desde entonces, siguiendo el mismo procedimiento general, varios laboratorios han obtenido también híbridos que contienen el cromosoma 21.

En el Instituto Eleanor Roosevelt para la Investigación del Cáncer, de Denver, utilizamos cierta estirpe de células ováricas de hámster chino (CHO) en vez de las células A9 de ratón. Las células CHO resultan ideales para los estudios de hibridación celular del cromosoma 21 ya que portan una mutación que inactiva el gen *Gart*, que en los seres humanos reside en el cromosoma 21; el gen codifica la fosforribosilglicinamida sintetasa. Puesto que carecen de esa enzima, las células CHO deben cultivarse en un medio que contenga purinas, sin las cuales morirían. Si se hibridan células CHO con células humanas, cualquier híbrido que porte el cromosoma 21 crecerá en un medio sin purinas, pues dispondrá del gen *Gart* humano. Pueden así seleccionarse las células híbridas que hayan retenido el cromosoma 21.

Ciertas variaciones de la técnica han permitido aislar el gen *Gart* en una estrecha región del cromosoma 21, denominada 21q22, mediante la creación de híbridos de células CHO y células humanas que contenían una traslocación del cromosoma 21. Gracias al análisis citogénico de los cromosomas de traslocación en células híbridas, hemos conseguido fraccionar el cromosoma 21 en varias subregiones y asignar marcadores genéticos a la subregión que incluía el gen *Gart*. El único inconveniente del método de localización es que depende de la ocurrencia natural de translocaciones que afecten a diversos fragmentos del cromosoma 21; tales translocaciones son muy poco frecuentes.

Se soslaya la escasez de fragmentos de traslocación rompiendo el cromosoma 21 y exponiéndolo a dosis elevadas de radiación. Los fragmentos obtenidos d ese modo pueden hibridarse con células de hámster chino y manipularse del mismo modo que los naturales. Puede estudiarse en los híbridos la presencia de genes específicos, o formarse secuencias de ADN y grupos de unión molecular utilizando de pivote el gen *Gart*.

El último paso de la creación de un mapa de alta resolución del cromosoma 21 requiere que se mida la distancia física que media entre los distintos genes y marcadores, contabilizándose el número de pares de bases que

los separan. La herramienta básica es la técnica denominada de electroforesis, en la que los fragmentos de ADN se someten a un campo eléctrico. El ADN posee una carga negativa proporcional a su tamaño, por lo que las moléculas de ADN se desplazan hacia el electrodo positivo. Los fragmentos más pequeños se mueven relativamente deprisa, mientras que los mayores lo hacen más despacio. La posición final de los fragmentos en el gel informa de su tamaño, medido en pares de bases.

David C. Schwartz y Charles R. Cantor, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Columbia, idearon una variante de la técnica habitual de electroforesis: someter el ADN a campos pulsátiles de corriente eléctrica diagonales. Por razones no bien conocidas, ello permite que los fragmentos de ADN sumamente grandes (cuyo tamaño oscila desde 50.000 hasta más de 5 millones de pares de bases) se desplacen y se separen unos de otros. La electroforesis habitual analiza fragmentos que no superen los 50.000 pares de bases. Sin embargo, los genes presentan una gran diversidad de tamaños. Muchos superan de largo los 50.000 pares de bases; se calcula que algunos alcanzan el millón de pares de bases, y más. La técnica del campo pulsátil permite a los genetistas analizar el gen entero, en lugar de un fragmento, así como porciones grandes de ADN, que pueden contener varios genes.

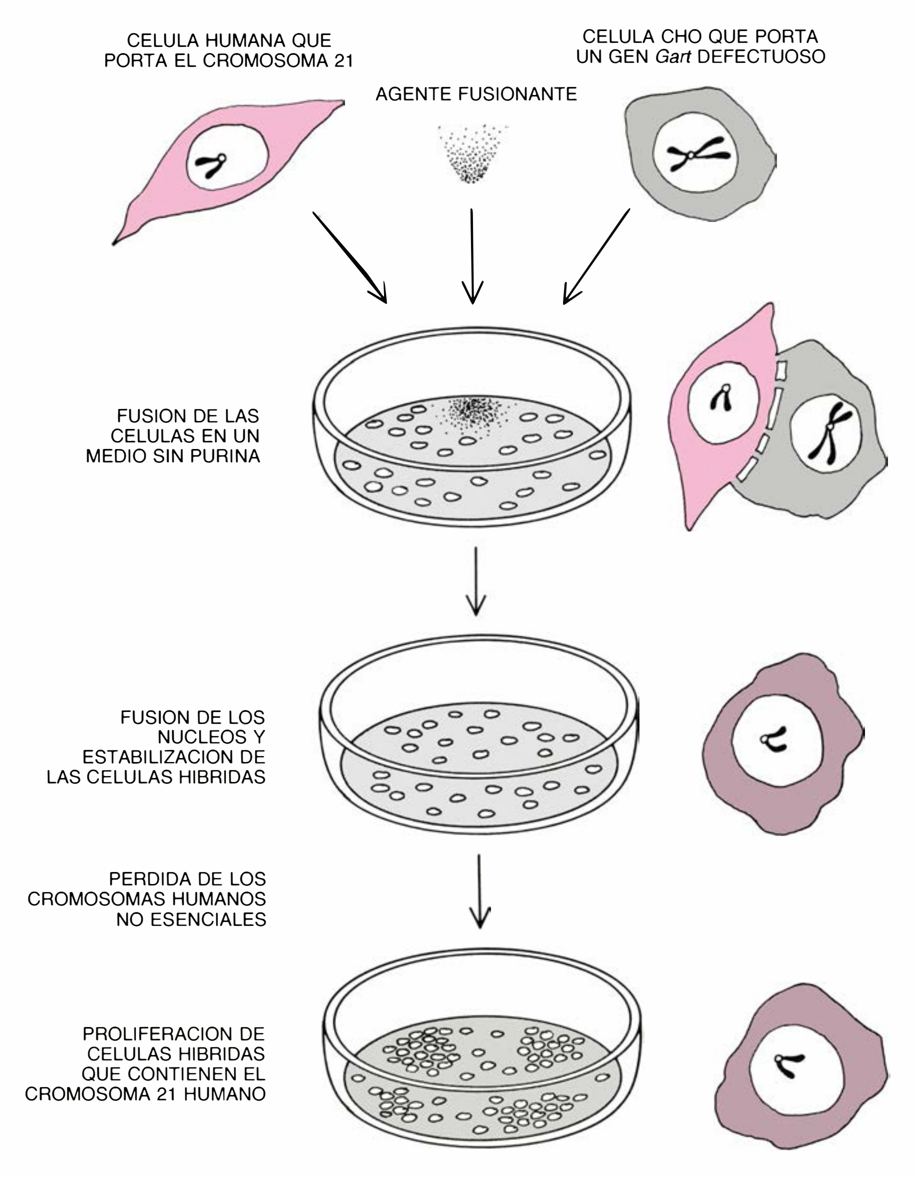
Comparando los mapas obtenidos con los distintos métodos se comprueba que en general coinciden, al menos en lo que atañe al orden de los fragmentos de ADN y marcadores en el cromosoma 21. Combinando la información procedente de esos métodos y la de diversos estudios clínicos y citogenéticos, se han identificado varios genes en la banda 21q22 del cromosoma 21. Dicha banda parece ser la región del cromosoma específicamente responsable de la patogénesis del síndrome de Down.

La próxima tarea será relacionar esos genes con patologías específicas. Puesto que los genes determinan proteínas, que son, en último término, las responsables del fenotipo humano, resulta obvia la importancia de conocer las proteínas que contribuyen a la patología del síndrome de Down. Cuando se haya identificado las proteínas y definido sus efectos, quizá se ideen medidas para contrarrestar los efectos perjudiciales de esas proteínas.

Entre los genes localizados en la banda 21q22 del cromosoma 21 se cuentan el *Gart*, ya mencionado, el *ets*-2 y los genes que codifican la alfa-A-cristalina, la superóxido dismutasa y las proteínas beta amiloides. Esos genes proporcionan una visión fascinante de la compleja relación que guardan los genes (y las proteínas que codifican) y el desarrollo y la enfermedad en el ser humano. Por ejemplo, recientes adelantos en biología molecular han aportado datos interesantes sobre la posible relación entre el gen *ets*-2 del cromosoma 21 y la leucemia.

Los médicos saben, desde hace años, que los individuos con síndrome de Down presentan un riesgo elevado de padecer leucemia, pero han sido incapaces de explicar los mecanismos subyacentes a esa coincidencia. Los oncólogos han descubierto que, en la leucemia aguda mieloide del subgrupo M2, un 18 por ciento de los sujetos afectos presentan una traslocación cromosómica recíproca entre fragmentos de los cromosomas 8 y 21. No padecen el síndrome de Down y sólo están afectadas las células leucémicas, mientras que los cromosomas de las otras células parecen ser normales. Los científicos consiguieron localizar el punto de ruptura del cromosoma 21 en la región q22 mediante los métodos de trazado de mapas citogenéticos. Otro hallazgo fascinante: la trisomía del 21 es la anomalía cromosómica que con más frecuencia se observa en las células leucémicas, especialmente en los niños.

En 1985, Janet D. Rowley y sus colegas, de la Facultad de Medicina Pritzker de la Universidad de Chicago, en



5. HIBRIDACION DE CELULAS SOMATICAS entre células humanas y células de ovario de hámster chino (CHO), de la que se obtienen híbridos que contienen cromosomas de ambas especies. Al medio de cultivo se le añade un agente fusionante, por ejemplo, el virus Sendai o el polietilénglicol, para que estimule la unión. Se pueden hibridar células humanas con células CHO, que son incapaces de sintetizar purina porque carecen del gen *Gart*. Conforme las células se dividen, van perdiéndose los cromosomas humanos que no resultan esenciales para el crecimiento del híbrido. Si la hibridación se efectúa en un medio sin purina, sólo sobrevivirán las células que contengan el gen *Gart* humano (sito en el cromosoma 21) y que, por tanto, puedan sintetizar purina por sí mismas. Las células híbridas supervivientes son las que contienen todo o parte del cromosoma 21. Si sólo se retiene parte del cromosoma, puede identificarse la región que contiene *Gart*.

colaboración con nuestro grupo, sugirieron que la causa de la leucemia podía ser una alteración de la actividad de uno o más oncogenes (genes que causan cáncer) del cromosoma 21. Aventuramos que la trisomía del cromosoma 21, o una traslocación del material genético del cromosoma 21 al cromosoma 8, podrían ser responsables de la alteración.

Cada vez disponemos de más datos que ratifican esa hipótesis. Takis S. Papas, del Instituto Nacional estadounidense del Cáncer, en colaboración con otros investigadores, incluidos algunos miembros de nuestro grupo, ha demostrado que, en efecto, en el cromosoma 21 existe un oncogén, el denominado *ets*-2, y lo ha situado en la región implicada en la traslocación 8;21. Se está estudiando ya la expresión del gen *ets*-2 en células normales y comparándola con su expresión en células que sean trisómicas o que han sufrido traslocación.

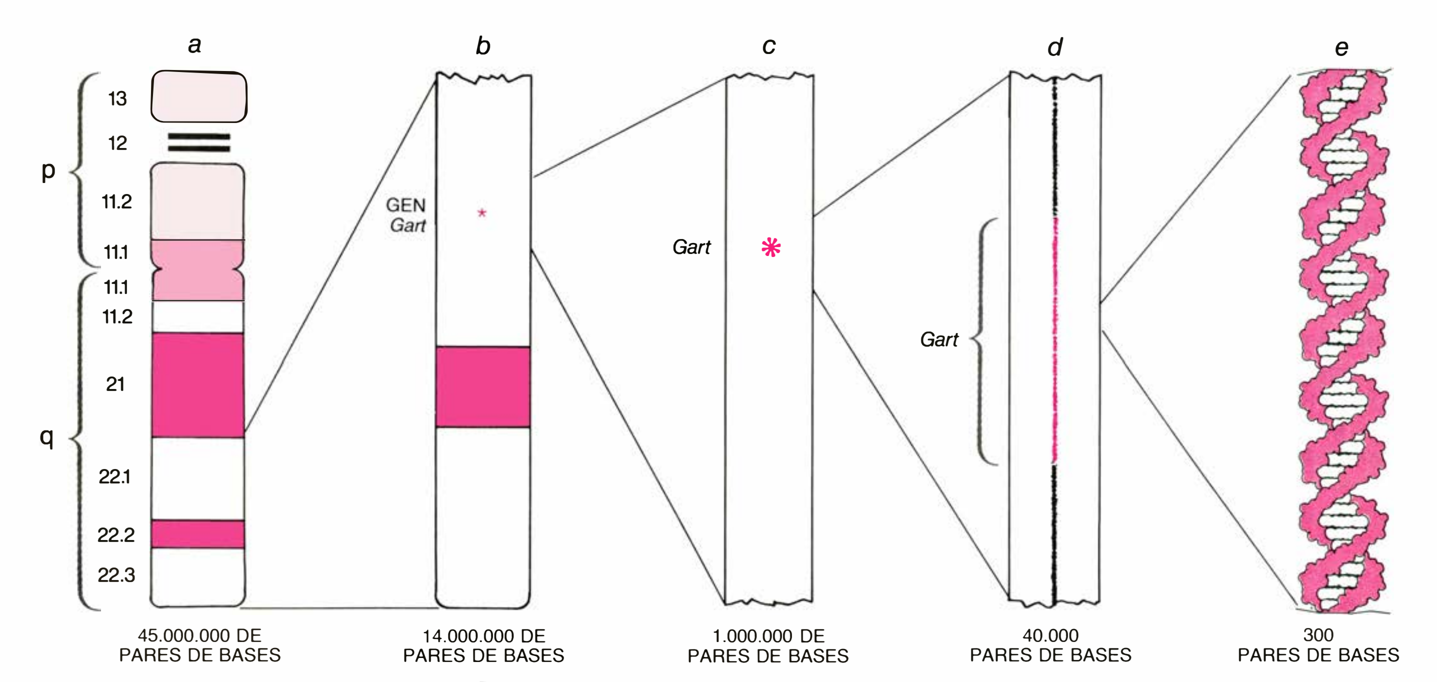
El descubrimiento de que el gen *Gart*, que codifica tres enzimas diferentes implicadas en la síntesis de purinas, se encuentra en la región 21q22 del cromosoma 21 podría explicar por qué los individuos afectados de síndrome de Down ofrecen niveles altos de purinas en el suero. La elevación de los niveles de purinas se relaciona con una amplia variedad de problemas, retraso mental incluido; por consiguiente, quizá baste la trisomía de ese único gen del cromosoma 21 para causar muchas de las alteraciones asociadas con el síndrome, en particular el retraso mental. Los investigadores confían en que el restablecimiento de los niveles normales de purinas mediante el control de la expresión del gen *Gart* (quizá en una fase temprana del desarrollo fetal) logre, en el futuro, mejorar la sintomatología del síndrome.

Asimismo, la expresión anómala de determinada proteína explicaría también el mayor riesgo que presentan los individuos con síndrome de Down de padecer cataratas y otros defectos de los cristalinos. Se ha descubierto que el gen que codifica la proteína alga-A-cristalina, un componente estructural del cristalino del ojo, se encuentra en la región 21q22 del cromosoma 21.

Otro gen identificado en el cromosoma 21 es el que codifica la forma soluble de la enzima superóxido dismutasa (SOD-1), que forma parte de un complejo sistema que protege las células de los mamíferos frente al oxígeno contenido en radicales libres; son éstas moléculas altamente reactivas, liberadas durante la oxidación, que quizás intervengan en el envejecimiento. Las alteraciones de los niveles de SOD-1 podrían contribuir al retraso mental en los pacientes de síndrome de Down y explicarían su acelerado envejecimiento. Al parecer, la enzima se expresa en función de la dosificación del gen, que se ha localizado en la región q22 del cromosoma 21. El conocimiento del mecanismo de acción de ese gen brindaría, en última instancia, datos fundamentales sobre el proceso normal de envejecimiento en el hombre.

Otro hallazgo reciente, más apasionante aún, es el de la relación genética entre la enfermedad de Alzheimer y el síndrome de Down. George G. Glenner y sus colegas, de la Universidad de California en San Diego, demostraron que la proteína beta amiloide (un componente principal de las placas neurofibrilares que proliferan en el cerebro de los pacientes con enfermedad de Alzheimer) es idéntica a la que se acumula en las lesiones, aparentemente iguales, del cerebro de todos los individuos afectados de síndrome de Down que superan los 35 años de edad. Científicos de varias instituciones determinaron, simultáneamente, que el gen de la proteína beta amiloide reside en el cromosoma 21. Además, descubrieron que el gen aparentemente responsable de una forma corriente de la enfermedad de Alzheimer se encuentra también en el cromosoma 21. Todavía no se sabe si esos dos genes son, en realidad, el mismo.

La identificación y localización de genes en el cromosoma 21 ha experimentado un notable desarrollo y, con



6. ANALISIS MOLECULAR del cromosoma 21. Efectuado en varios niveles de resolución, ha permitido la localización de genes en una región concreta del cromosoma, así como la determinación de su secuencia de pares de bases. El análisis citogenético se basa en dos métodos distintos: se pueden identificar regiones de ADN que midan de uno a dos millones de pares de bases mediante colorantes químicos (*a*) o puede trabajarse en un nivel de resolución mayor si se ha producido una translocación que afecte sólo a un fragmento del cromosoma 21 (*b*). Ciertas técnicas alcanzan resoluciones superiores incluso: la creación de híbridos interespecíficos de irradiación y la utilización de electroforesis pulsátil de campo (*c*), que alcanzan resoluciones de entre 10 millones y 30.000 pares de bases. Los métodos de clonación molecular y la electroforesis convencional en gel permiten resoluciones de 50.000 hasta tan sólo algunos centenares de pares de bases (*d*). Finalmente, puede conocerse la secuencia real de pares de bases de un gen particular mediante técnicas de secuenciación de ADN (*e*).

seguridad, los progresos serán superiores en el futuro. Pese a todo, los científicos aún no disponen de pruebas concretas que demuestren que la trisomía de siquiera parte del cromosoma 21 es causa directa de la enfermedad. Probablemente los últimos avances en ingeniería genética, que permiten la manipulación de modelos animales, pongan remedio a esa situación.

Los genetistas ya han descubierto que el cromosoma 16 del ratón contiene los genes *ets*-2, *Gart* y SOD-1, así como varias secuencias de ADN cuyos homólogos, según se sabe, residen en el cromosoma 21 humano. John D. Gearhart, de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, y Charles J. Epstein y David R. Cox, de la Facultad de Medicina San Francisco de la Universidad de California, y sus colaboradores, están tratando de producir ratones que tengan trisomías parciales del cromosoma 16 para comprobar si desarrollan algunas de las patologías asociadas con el síndrome de Down. Aunque es muy poco probable que los ratones obtenidos de esa forma presenten exactamente las mismas alteraciones que los humanos, parece razonable suponer que los mecanismos subyacentes a la expresión genética sean los mismos, por lo que la investigación con los roedores ofrecería a los genetistas nuevos conocimientos sobre la patogenia del síndrome de Down.

Otra herramienta muy prometedora de la genética molecular es una técnica de ingeniería genética que permite la creación de ratones transgenéticos, es decir, ratones que contienen genes aislados, o grupos de genes, procedentes del ser humano. La viabilidad de esa técnica se ha demostrado ampliamente en el estudio de los oncogenes, genes del factor del crecimiento y genes metabólico-enzimáticos; ha llegado el momento de aplicarla a aquellos genes del cromosoma 21 que se asocian con el síndrome de Down.

En experimentos futuros se inyectarán genes del cromosoma 21, así *ets*-2, SOD-1 y *Gart*, en el interior de células embrionarias de ratón y se expresarán en la descendencia resultante, lo que permitirá estudiar los efectos de la trisomía de un solo gen o de un pequeño grupo de genes y brindará abundante información sobre la multiplicidad de efectos de un único gen. En último término quizá pueda valorarse, en esos modelos animales, aproximaciones diversas para prevenir o tratar algunas de las alteraciones asociadas con el síndrome de Down.

Ciencia y sociedad

Escombros espaciales

A principios de 1986, un cohete del consorcio europeo Arianspace se alzó hacia el firmamento cargado con el satélite *Spot 1*. Tras situar en órbita el ingenio francés de teledetección, la tercera fase del impulsor del cohete quedó también orbitando. De modo inexplicable, en noviembre de ese mismo año el impulsor estalló, sumándose una nueva cuota de metralla al enjambre de objetos que pululan alrededor del globo, ya denso y potencialmente peligroso.

La nube de desechos que rodea la tierra empieza a preocupar a los técnicos espaciales, precisamente cuando europeos y norteamericanos proyectan incrementar su presencia en el cosmos con renovados programas de lanzaderas, la estación espacial y probablemente la Iniciativa de Defensa Estratégica (SDI). El Mando de la Defensa Aérea de América del Norte (NORAD) tiene localizados 7000 objetos del tamaño de una pelota de tenis o superiores, la mayoría satélites en funcionamiento o agotados e impulsores de cohetes. Afirma Donald J. Kessler, de la NASA, que hace cuatro años sólo se conocían 4000, y que en órbita debe haber alrededor de 40.000 objetos de tamaños comprendidos entre el del guisante y las pelotas de tenis.

La colisión de una pieza del volumen de un guisante lanzada a 10 kilómetros por segundo contra una nave espacial o un astronauta alcanzaría el poder destructor de una granada de mano, ha calculado Nicholas L. Johnson, de Teledyne Brown Engineering. Objetos mucho menores también ocasionarían daños de importancia. En 1984, a la vuelta de una misión, en la lanzadera *Challenger* se descubrió un hoyo de un centímetro de diámetro en uno de los vidrios del parabrisas. Según comprobaron los especialistas, contra el vidrio (que tuvo que sustituirse) había chocado una escama de pintura de sólo 0,2 milímetros de anchura.

1. SATELITES, LANZADORES Y RESIDUOS de diámetros superiores a los 10 centímetros pululan alrededor de la Tierra en este listado de ordenador obtenido por ingenieros de la Lockheed. La imagen se basa en datos reunidos por el Mando de la Defensa Aérea de América del Norte (NORAD)

Johnson señala que los proyectistas de la estación espacial han decidido incorporar blindajes que la protejan de proyectiles de hasta un centímetro de diámetro; pero es demasiado tarde para rediseñar el Telescopio Espacial Hubble, cuyo lanzamiento está previsto para principios de la década de 1990. Michael M. Shara, del Instituto Científico del Telescopio Espacial, ha calculado recientemente que la probabilidad de que el telescopio resulte destruido durante su vida operativa es del 1 por ciento, y del 50 por ciento de que lo dañe algún resto.

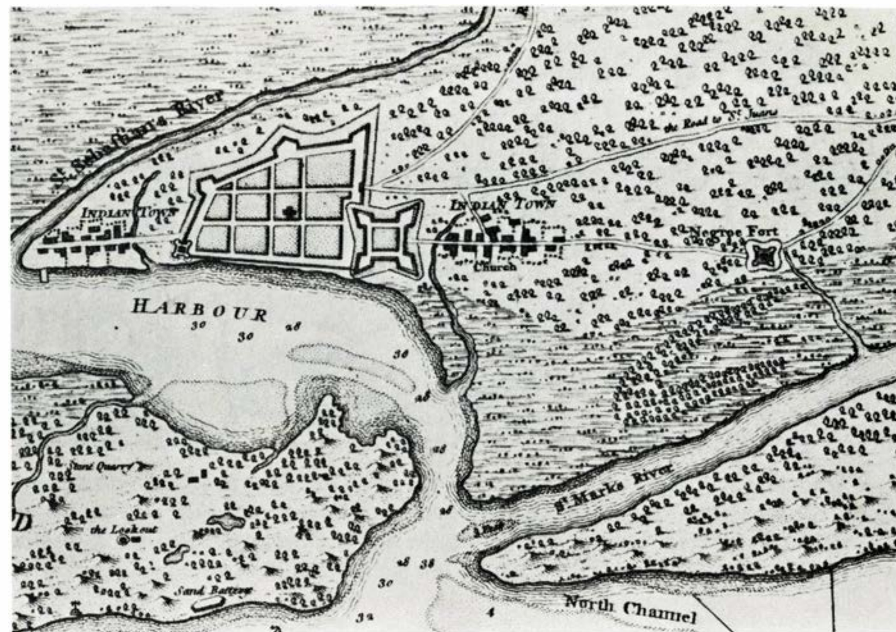
Los objetos reflectores de la luz del sol que crucen el campo cubierto por el telescopio podrían también lesionar sus sensores, muy delicados. Esos objetos han afectado ya a la astronomía con base en tierra. Paul D. Maley, de la Rockwell Shuttle Operations Company, ha propuesto recientemente en el *Astrophysical Journal* que los destellos ópticos atribuidos a una fuente de rayos gamma situada fuera del sistema solar podrían ser un satélite soviético que refleja la luz del sol. Maley cree que esa no sería la primera vez que los restos espaciales engañan a los astrónomos.

Preocupa a los técnicos de la SDI la posibilidad de que los residuos inutilicen los sensores y armas desplegados en el espacio. Michael Kemp, director de los programas de probabilidad de supervivencia de la SDI, ha declarado que "por supuesto que estudiamos la cuestión de los residuos espaciales —los de hoy y los de mañana". Según Shara, las pruebas efectuadas en el marco de la SDI podrían agravar el problema.

El cohete de la Arianespace constituye un añadido reciente; la gran mayoría de los restos son responsabilidad de los Estados Unidos y de la Unión Soviética. Norteamérica, ha comentado Robert C. Reynolds, de la Lockheed Engineering and Management Services, Inc., "probablemente ostenta el dudoso honor de haber generado el mayor número de escombros" con la serie de impulsores Delta que explotó durante la década de 1970. La contribución soviética procede del ensayo de armas contrasatélites y de la destrucción deliberada de satélites fuera de servicio.

La NASA y Arianespace se han empeñado en el diseño de componentes de menor probabilidad de explosión y





2. COMO "NEGROE FORT" aparece rotulada en un mapa británico de 1740 la avanzada de la colonia española de San Agustín donde se instalaron los que probablemente fueran primeros negros libertos de Norteamérica. A la izquierda, arqueólogos del Museo estatal de Florida excavando el yacimiento de la fortaleza, hoy una isla rodeada de marismas

que puedan guiarse de vuelta a la atmósfera una vez concluida su tarea. Según Reynolds, la NASA estudia asimismo el modo de frenar los objetos situados en órbita, quizá por medio de láseres o de haces de partículas, para que entren de nuevo en la atmósfera y se incineren en ella. Es probable que se aborden esas tácticas en la sesión de la Federación Astronómica Internacional que debe celebrarse este mismo año.

Mantener la fortaleza

En documentos españoles del siglo XVIII y en una marisma del norte de Florida se está desenterrando la historia de Fort Mose, considerado el primer asentamiento fundado por negros libres en lo que hoy son los Estados Unidos. Desde 1738 hasta 1763, unos cien negros habitaron la fortaleza o sus alrededores, una avanzadilla de la colonia española de San Agustín.

Según Kathleen A. Deagan, del Museo estatal de Florida, que dirige el proyecto, la mayoría de los habitantes del castillo eran africanos; escapando de la esclavitud, habían huido desde las Carolinas, controladas por británicos, hasta tierras de Florida, dominadas por españoles, quienes habían prometido liberar a los esclavos que se declararan enemigos de los ingleses y se convirtieran al catolicismo. En 1738, el gobernador español ordenó a los libertos que se instalaran en una construcción levantada a varios kilómetros de San Agustín, que actuaría de parapeto frente a las acometidas británicas y de los indios.

En la actualidad, el lugar constituye una isla rodeada de marismas. Según los mapas y los relatos de la época, en el siglo XVIII el terreno que rodeaba la isla se encontraba lo bastante seco para cultivarlo. Sin embargo, el constante peligro de ataques hacía peligrosas las labores de la tierra. En 1740, los soldados de color se unieron a los españoles e indios pacíficos en el rechazo de una importante invasión de tropas inglesas.

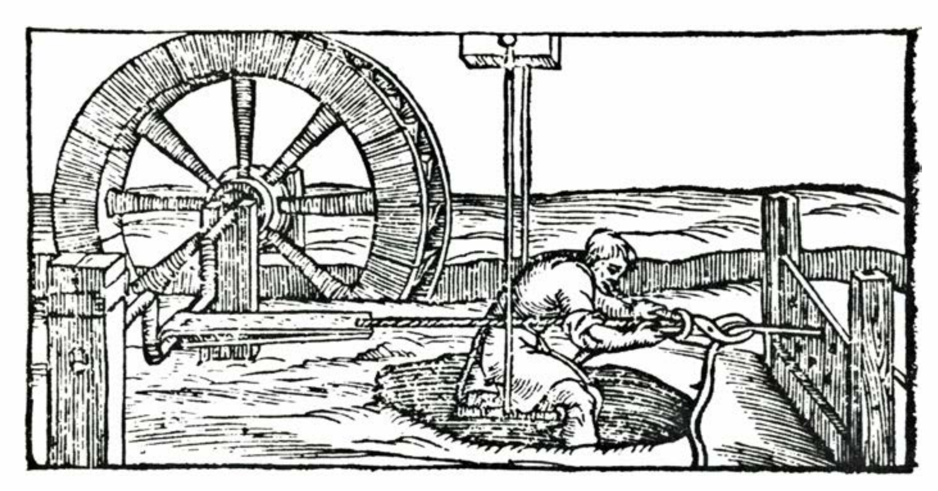
Deagan confía que la excavación del yacimiento, iniciada el pasado enero, revele si los moradores conservaban herramientas, prácticas alimentarias y creencias africanas. Hasta la fecha, los científicos han recuperado balas de arcabuz, pedernales, huesos de animales, fragmentos de cerámica y vidrio, boquillas de pipa, hebillas de metal y bisagras. Han descubierto también señales de un foso en tres lugares de la isla y de gruesos mástiles en el centro: los restos, quizá, de una torre de vigilancia o de una capilla.

Jane L. Landers, doctoranda de la Universidad de Florida y la historiadora del equipo, ha revisado, en Florida y en España, los archivos donde se describen el fuerte y sus habitantes. En textos gubernamentales y en otros documentos de la época, afirma, se indica que los soldados negros y sus familias habitaban la fortaleza acompañados de un puñado de soldados españoles y un religioso. Al obtener los británicos el control de Florida, en 1763, la mayoría de los antiguos esclavos abandonó la zona junto con los españoles y se reinstaló en Cuba.

Landers sostiene que los soldados se encontraban a las órdenes de un africano mandingo, que en los documentos aparece citado como Francisco Menéndez. Escapó de una plantación británica de Carolina del Sur, para unirse a un grupo de indios que luchó contra los británicos durante dos años. En 1726, según Landers, llegó a San Agustín, donde un indio llamado Perro Loco lo habría vendido como esclavo. Ayudado por el jefe indio con el que había batallado contra los ingleses, Menéndez pidió su libertad al gobernador español, siéndole concedida.

Los soldados negros del fuerte lo eligieron comandante y Menéndez solicitó a los españoles que se pagaran los servicios de sus hombres. La nota de petición aparece firmada por su nombre, de lo que Landers deduce que Menéndez sabía leer y escribir, hecho infrecuente, señala, entre los colonizadores, de la raza que fueran.

Robert L. Hall, de la Universidad de Maryland en el Condado de Baltimore, indica que la excavación de Fort Mose revela "un creciente —en realidad un renovado— interés por la resistencia a la esclavitud por parte de los negros en el Nuevo Mundo". Peter H. Wood, de la Universidad de Duke, coincide con ello y añade que "lo que confiere interés a Fort Mose no es que se tratara de un bastión de la libertad, sino que



3. ESTIRADO de una barra de hierro a través de agujeros progresivamente menores. Un paso previo especial de purificación permitió introducir la energía hidráulica en el proceso y obtener una aleación que, a principios del siglo XVII, posibilitó dotar a los clavicordios de cuerdas más largas

ejemplifica los problemas que habían de afrontar los hombres libres".

El clave bien temperado

A principios del siglo XVII se aumentó la longitud de los clavicordios y otros instrumentos musicales barrocos. No se conocen en detalle las razones musicológicas de esa evolución, pero no pudo producirse ésta sin disponerse de cables capaces de soportar el aumento de tensión a que, por su mayor longitud, se someterían las cuerdas para alcanzar la altura sonora debida.

Los musicólogos creen que el cable de esas cuerdas, más largas y resistentes, debió ser de acero, pero los resultados de una detallada investigación realizada por Martha Goodway, de la Institución Smithsoniana, parecen contradecirles. Según informa Goodway en *Science*, las cuerdas de clavicordio fechadas a principios del siglo XVII no estaban hechas de acero (en esencia una mezcla de hierro y carbono), sino de una aleación de hierro y fósforo, elemento que suele considerarse una impureza indeseable. En realidad, el contenido en fósforo de la aleación es suficientemente elevado para impedir su transformación en acero.

La investigación de Goodway, encuadrada en un estudio más amplio de cables de música de la antigüedad, comenzó con el análisis químico y metalúrgico de muestras de cuerdas de clavicordio originales reunidas por J. Scott Odell, de la Smithsoniana. Odell encontró restos de las cuerdas incrustados en la caja armónica y en la cola y la pintura de clavicordios antiguos, en cuya búsqueda utilizó en ocasiones instrumentos de rayos X. El análisis de los fragmentos reveló que estaban formados mayoritariamente por hierro, en el que no se detectaron trazas de carbono y sí un elevado contenido en fósforo.

Si las cuerdas no eran de acero, ¿cómo se les confería resistencia para soportar el aumento de tensión que soportaban en los nuevos clavicordios? El único elemento con el que podía formarse aleación, el fósforo, suele generar un acero frágil, poco dúctil para estirarlo. ¿Qué procedimiento aplicaron los metalúrgicos del siglo XVII para incrementar la resistencia del cable de hierro aleándolo con fósforo?

Goodway revisó tratados metalúrgicos contemporáneos y advirtió que el cable se fabricaba siempre con material de la primera colada que salía del horno. Ese metal que, según Goodway, debía despreciarse en la fabricación de acero, contiene una concentración elevada de carbono y de fósforo. El material, ya solidificado, resultaría demasiado quebradizo para estirarlo en cable de no haberse sometido a un proceso especial de "purificación": el hierro se refundía en un fuego abierto para que el carbono se oxidara y quedara fósforo como único elemento de aleación. Tal procedimiento purificador, que conservaba el fósforo y extraía por completo el carbono, se introdujo en el siglo XV, con el advenimiento del estirado impulsado por energía hidráulica, que requería hierro de excepcional limpieza.

Según Goodway, precisamente ese refinamiento de la siderurgia tradicional —y no la introducción de nuevas técnicas de acería— rindió las cuerdas de resistencia mejorada que, a su vez, influyeron en el diseño de los clavicordios y otros instrumentos de cuerdas de metal. Para someter a prueba su hipótesis, la autora hizo fabricar un lote de hierro rico en fósforo y pobre en carbono. Como sospechaba, la aleación se hilaba con facilidad en cables que presentaban el diámetro y la resistencia tensil indicadas para obtener las cuerdas de los nuevos clavicordios.

El ojo del huracán

¿Qué velocidad alcanza el viento en un huracán? No se sabe con exactitud, pues los instrumentos de medida de que se dispone no suelen encontrarse en el lugar adecuado; y cuando lo están, las lecturas se salen de la escala.

Wes Unruh, físico del Laboratorio Nacional estadounidense de Los Alamos, acaba de desarrollar un radar portátil de efecto Doppler que puede medir un espectro de velocidades que abarca las que se alcanzan en los huracanes. Howard Bluestein, meteorólogo de la Universidad de Oklahoma, ha preparado un sistema de seguimiento de huracanes que permite efectuar mediciones con el radar portátil. Según las previsiones de Unruh y Bluestein, en el interior de los huracanes las corrientes aéreas podrían ascender girando a 370 kilómetros por hora.

Ese tipo de radar explota el denominado desplazamiento Doppler: el cambio de frecuencia de las ondas sonoras o electromagnéticas generadas por un objeto en movimiento, o reflejadas en él. El radar Doppler portátil, impulsado por acumuladores, dirige un haz de microondas hacia el ojo del huracán. La señal se refleja en el remolino de escombros y en la nube de lluvia, retornando a la unidad de radar. Las ondas electromagnéticas reflejadas por el material que se aleja del radar mostrarán un descenso de la frecuencia; los objetos que se aproximan imprimen a la energía reflejada una frecuencia más elevada. El análisis de esos desplazamientos permite estimar la velocidad del viento en el huracán, así como el avance de la tormenta.

De hecho, el radar es capaz de medir la velocidad y la dirección del viento de cualquier tormenta, lo que podría interesar a los aeronáuticos que estudian las corrientes de cizalladura. La aplicación inmediata del ingenio es la mejora del conocimiento de los fenómenos que se registran en el interior de los huracanes. Cuando se disponga de esos datos, quizá puedan desplegarse grupos de radares portátiles que efectúen predicciones detalladas sobre cuándo y por dónde pasará un huracán.

La teoría de la selección clonal

Los anticuerpos que defienden nuestro cuerpo de la invasión de sustancias extrañas son muy diversos. Se ha tardado casi un siglo en definir y consolidar la teoría que explica su formación

Gordon L. Ada y Sir Gustav Nossal

¿Cómo logran las células fabricar tan ingente variedad de anticuerpos? En buena parte se ha respondido ya a esa pregunta y la medicina y la investigación utilizan en su beneficio las proteínas protectoras que elabora el sistema inmunitario. No hace mucho, sin embargo, los anticuerpos resultaban bastante más misteriosos. Varias teorías pretendían esclarecer, con postulados encontrados, su origen y su modo de acción.

El problema de la elaboración de los anticuerpos reside en la increíble diversidad de los antígenos: las sustancias foráneas que instan la respuesta inmunitaria. Los anticuerpos sólo pueden neutralizar un tipo de antígeno cada uno, mientras que éstos se presentan en gran variedad de formas, tamaños y composiciones químicas. Bacterias y sus toxinas, granos de polen, células de la sangre incompatibles y moléculas sintéticas pueden actuar como antígenos. Para atrapar cada tipo de intruso, los glóbulos blancos denominados linfocitos *B* se ven obligados a generar huestes de esos anticuerpos diseñados a medida.

El principal punto de debate entre los primeros teóricos, hasta el extremo de dividirlos en dos bandos, fue el relativo al mecanismo por medio del cual los antígenos conducen la reacción inmunitaria. Una escuela defendía que los antígenos actuarían como moldes del diseño de los correspondientes anticuerpos. Otra, que los linfocitos mantendrían un contingente de anticuerpos diseñados de antemano, de entre los cuales el antígeno seleccionaría su complementario más aproximado. A lo largo de los últimos 30 años, la reunión de esfuerzos de investigadores de muchos países ha aclarado las bases biológicas de la inmunidad y, a la vez, ha resuelto el conflicto: triunfó la segunda opción, que ha quedado plasmada en la teoría de la selección clonal de la formación de anticuerpos.

Expondremos aquí la formulación y la validación de la teoría de la selección clonal; propuesta en sus rasgos esenciales hace casi 100 años, tan pronto ganaba como perdía el favor de los científicos, en función de las pruebas disponibles y de la especulación. Los autores hemos tenido ambos el privilegio de tomar parte en las investigaciones que, en la década de 1960, la recuperaron en su nueva versión.

Antecedentes

La búsqueda del mecanismo de formación de los anticuerpos comenzó bastante avanzado el siglo XIX, cuando se había abierto ya camino la teoría del origen bacteriano de las enfermedades infecciosas propuesta por Louis Pasteur. Varios grupos habían comenzado a estudiar la reacción entre toxinas bacterianas y las "antitoxinas" que aparecen en el suero sanguíneo tras la infección. El bacteriólogo alemán Emil A. von Behring llamó a esas sustancias "Antikörper": anticuerpos.

La reacción entre anticuerpos y antígenos podía observarse en el tubo de ensayo: los reactivos formaban agregados macroscópicos. Pronto se demostró que no sólo los productos bacterianos podían instar la elaboración de anticuerpos. Otras sustancias naturales, como las proteínas de la leche y las células "foráneas" eran igualmente capaces de provocarla en el animal "hospedador".

En 1890, Von Behring, que había desarrollado una antitoxina contra la difteria, conoció a otro investigador alemán, Paul Ehrlich, quien habría de publicar un artículo que constituiría un hito de la investigación médica. En él describió una técnica de determinación de anticuerpos de la difteria en preparaciones como las de Von Behring, que permitió la normalización de tales preparaciones y la utilización de antisueros contra la difteria en la práctica clínica.

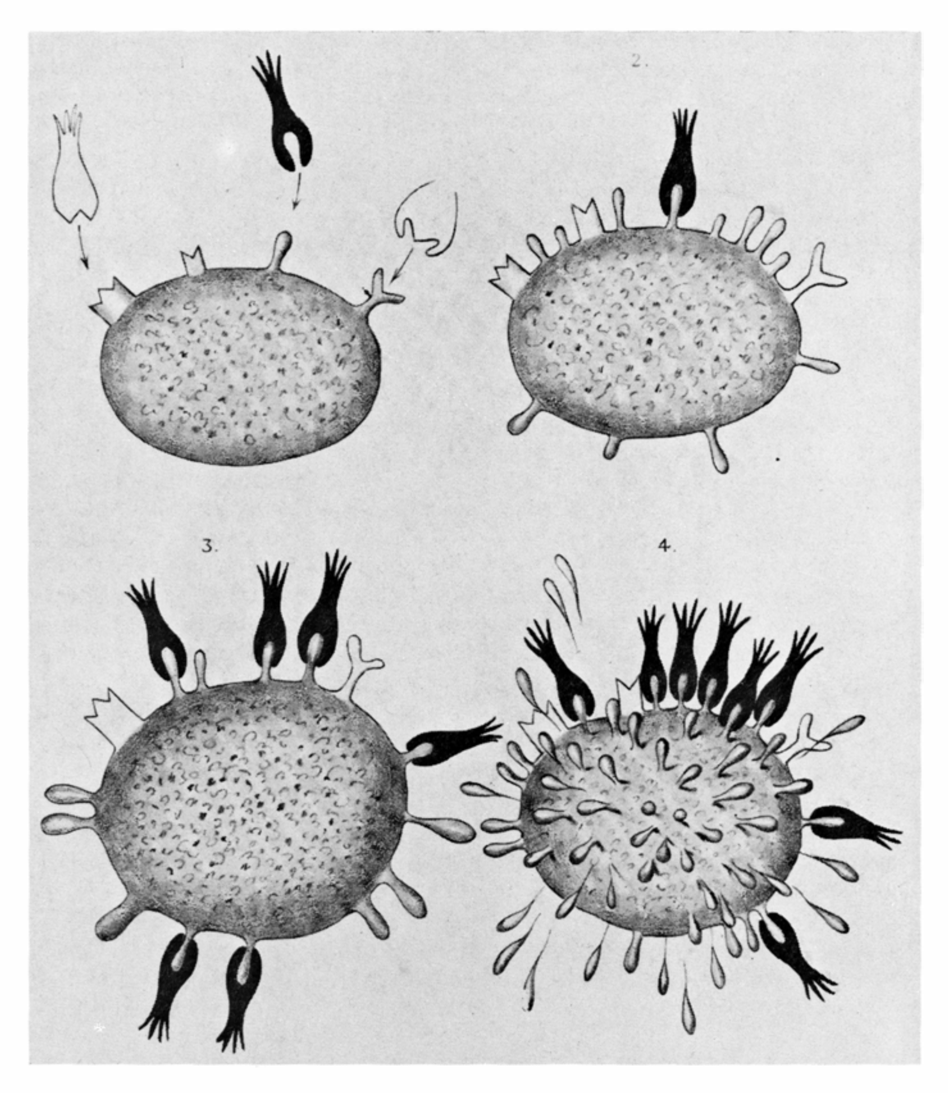
Con esta técnica de valoración de anticuerpos Ehrlich estableció las bases que confirieron a la inmunología un enfoque cuantitativo. Las nuevas observaciones cuantitativas revelaron que la respuesta inmunitaria constituía una proliferación explosiva de anticuerpos tras el contacto con un agente infeccioso. Para explicar cómo inducían tal reacción las sustancias extrañas, desarrolló su "teoría de las cadenas laterales" de la formación de anticuerpos.

La teoría de las cadenas laterales, cuyo anuncio coincide con el cambio de siglo, postulaba que los leucocitos portan en su superficie receptores dotados de cadenas laterales a las que se unirían químicamente las sustancias extrañas al organismo. La unión induciría a la célula a producir múltiples copias del receptor afectado. Los receptores superfluos —los anticuerpos— se desgajarían y quedarían en libertad en la sangre. La noción decisiva que encerraba el planteamiento de Ehrlich era que las células sintetizaban de manera natural cadenas laterales que serían capaces de unirse a cualquier sustancia extraña al organismo.

Algunos críticos de la teoría de Ehrlich se oponían a la idea de una unión química entre el antígeno y su receptor. Otros investigadores aceptaron la idea, si bien discutían el mecanismo de unión del antígeno. ¿Se "tragaba" la célula el complejo antígeno-receptor, o más bien se trataba de una reacción reversible, en la que los receptores atrapaban a los antígenos y luego los dejaban libres? Debates de ese tipo aumentaron el interés por el estudio de las reacciones antígeno-anticuerpo y el de la es-

1. PAUL EHRLICH, químico alemán y padre de la selección clonal, avanzó en 1900 la existencia de anticuerpos, a modo de receptores específicos dispuestos sobre la superficie celular. Sus trabajos, por los que recibió el premio Nobel, contribuyeron al desarrollo de un antisuero para el tratamiento de la difteria y a la síntesis de un fármaco contra la sífilis.





2. DIBUJO DEL PROPIO EHRLICH que ilustra la teoría de las cadenas laterales, aparecido en un artículo de 1900 donde anunciaba sus nuevas ideas. Cuando una sustancia extraña (*negro*) se une a un receptor celular (*1, 2*), la célula se ve estimulada a fabricar y liberar receptores, es decir, anticuerpos, del mismo tipo (*3, 4*).

pecificidad de los anticuerpos. Se sabía que los anticuerpos comienzan a circular en la sangre del animal poco después de su primer contacto con un antígeno y, también, que un segundo contacto con el mismo antígeno insta una respuesta más rápida y enérgica. Se desconocía, sin embargo, la peculiaridad de esos anticuerpos.

Se forja la teoría del molde

Muchos investigadores abordaron el problema de la especificidad de los anticuerpos examinando los efectos causados por anticuerpos modificados. En 1906, Ernest P. Pick y Friedrich Obermayer demostraron, en Alemania, que la introducción de grupos químicos como el iodo o el nitrato en la estructura de una proteína alteraba profundamente sus propiedades antigénicas. Casi simultáneamente, el inmunólogo de origen austriaco Karl Landsteiner adoptó una estrategia experimental semejante. Su trabajo, la mayor parte del cual lo realizó en el Instituto Rockefeller de Investigaciones Médicas, se prolongó durante tres décadas y demostró de modo concluyente la exquisita especificidad de los anticuerpos.

Landsteiner acopló a proteínas antigénicas una gran variedad de grupos químicos, unos procedentes de microbios patógenos y otros sintetizados *in vitro*. Cada molécula alterada propiciaba la formación de un anticuerpo distinto. Landsteiner confirmó así lo que ya habían averiguado Pick y Obermeyer: que las subunidades químicas de una estructura antigénica mayor podían determinar la especifidad inmunológica. Esos determinantes, que eran meras estructuras moleculares extrañas al organismo, no constituían antígenos por sí mismos: no podían iniciar la producción de anticuerpos a menos que se encontraran unidos a una molécula portadora.

Según sabemos ahora, muchos determinantes, demasiado pequeños, no pueden generar la respuesta inmunitaria por sí solos. Para ser reconocidos deben estar unidos a una molécula mayor. Sin embargo, hace 80 años, el hallazgo de que los determinantes no eran antígenos resultó desconcertante. Más aún, el descubrimiento de determinantes antigénicos indicaba que la diversidad de las sustancias extrañas que se enfrentan con el sistema inmunitario era mucho mayor que lo que en principio se había sospechado. En efecto, un único intruso, por ejemplo una bacteria, portaría miles de determinantes e iniciaría la producción de millares de anticuerpos diferentes.

De los estudios de Landsteiner se desprendía que un animal podía producir una variedad casi ilimitada de anticuerpos; deducíase también que podría elaborar incluso anticuerpos contra nuevos compuestos sintéticos. Descubrimientos que invitaban a concluir que el hospedador no disponía de la información necesaria para expresar un margen tan amplio de especificidades. La teoría de las cadenas laterales de Ehrlich cayó en descrédito, abriéndose camino la hipótesis según la cual los antígenos dirigirían la especificidad de los anticuerpos en el momento de sintetizarse éstos en la célula sanguínea.

¿Cómo puede un antígeno moldear la configuración de su correspondiente anticuerpo? A principios de la década de 1930 vieron la luz varias hipótesis, que necesariamente no pasaban de ser meras conjeturas. Friedrich Breinl y Felix Haurowitz, de la Universidad de Praga, y Stuart Mudd y Jerome Alexander, de la Universidad de Pennsylvania, defendieron que los anticuerpos se producían en contacto directo con sus antígenos, adoptando una forma y una afinidad química complementarias a las del antígeno. Sugirieron que los anticuerpos moldeados por distintos antígenos diferirían en su composición proteica, es decir, variarían las secuencias de sus aminoácidos constitutivos. Otros, especialmente Linus Pauling, argüían que sin más que plegar la misma proteína de anticuerpo de distintos modos se obtendría una amplia gama de especificidades. También aquí el plegamiento estaría guiado por un molde de antígeno. Este conjunto de hipótesis sobre el origen de los anticuerpos configuró la teoría del molde, vigente durante más de más de un cuarto de siglo.

Las precitadas discusiones sobre los mecanismos de formación de anticuer-

pos tuvieron lugar antes del nacimiento de la biología molecular, en la década de 1950; se fundamentaban más en conceptos teóricos que en datos experimentales. De ahí que la primera amenaza seria con que se enfrentó la teoría del molde la plantearan los biólogos, no los bioquímicos. Tres científicos, tan notables como los que les habían precedido, reunieron las pruebas incriminatorias. Dos recibirían más tarde el premio Nobel, como lo habían recibido Von Behring, Ehrlich y Landsteiner.

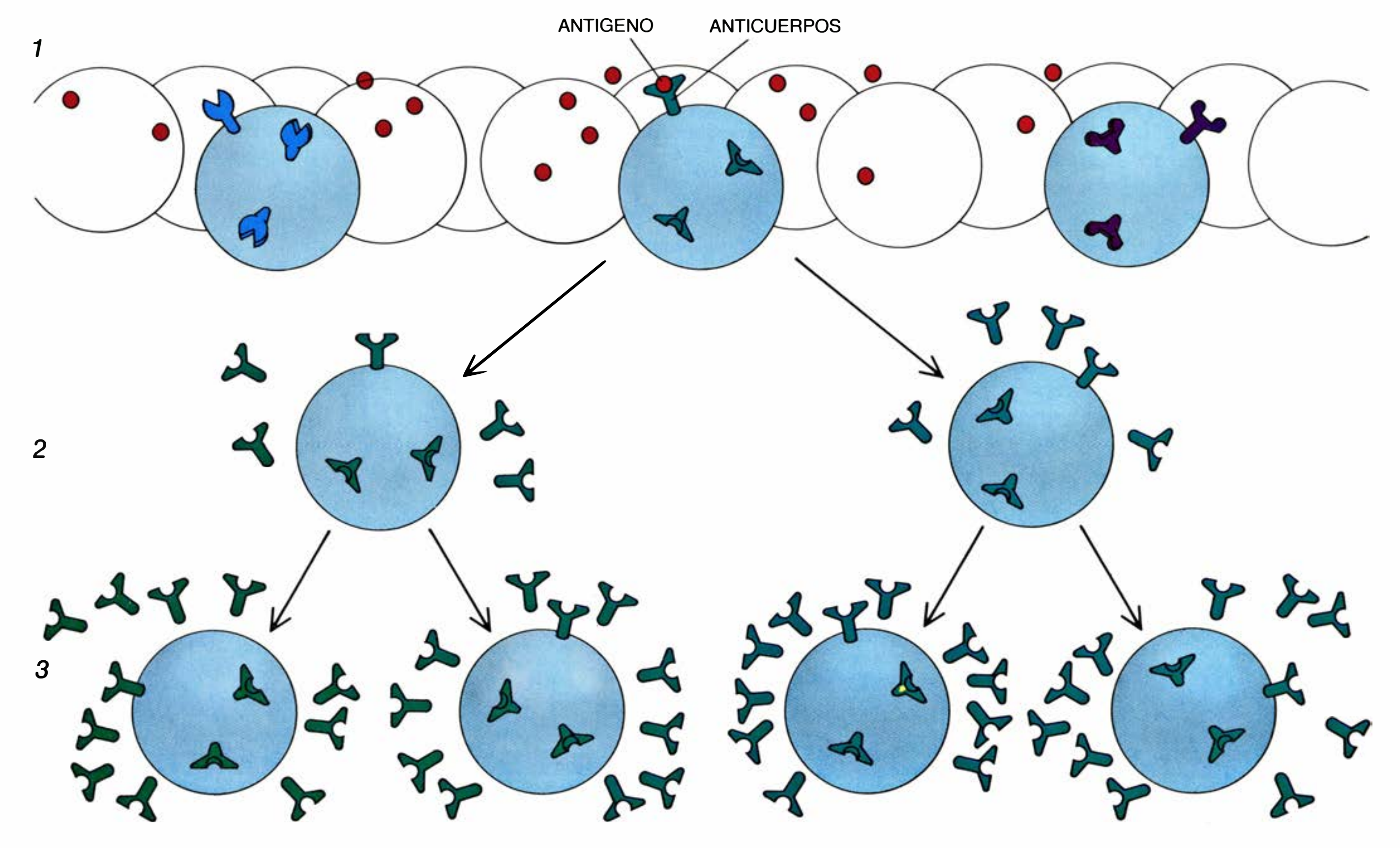
Una grieta en el molde

El primer ataque en toda regla lo lanzó en 1955 el inmunólogo danés Niels Kaj Jerne. En un artículo publicado ese mismo año, dos investigadores australianos, F. Macfarlane Burnet y Frank J. Fenner, citaban varias observaciones difícilmente reconciliables con la teoría del molde. En primer lugar, la teoría no podía explicar la elevación, aparentemente exponencial, de la producción de anticuerpos durante los primeros estadios de la respuesta inmunitaria. De requerirse un molde antigénico para fabricar cada anticuerpo, resultaba difícil explicar que los anticuerpos superaran tan pronto el número de sus moldes. Más aún, la teoría no podía explicar el impulso que registraba la producción de anticuerpos al toparse el animal por segunda vez con el mismo antígeno. ¿Por qué motivo la reintroducción de un molde habría de instar una elaboración de copias de anticuerpo superior a la que se produjo en el contacto inicial?

La persistencia de la síntesis de anticuerpos hasta bastante después de que el antígeno hubiera desaparecido ponía también en tela de juicio la teoría del molde pues, según se creía, las células productoras de anticuerpos eran de vida relativamente corta. Más aún, la teoría del molde no daba explicación al hecho de que, a medida que progresaba la reacción inmunitaria, parecía mejorar la capacidad de los anticuerpos para unirse a sus correspondientes antígenos.

Tal vez el argumento más convincente que hallaron Burnet y Fenner fue el de la tolerancia inmunológica. Se conocía ese fenómeno (la incapacidad de desencadenar una campaña inmunológica contra un antígeno determinado) desde poco antes de que Burnet y Fenner publicaran sus objeciones. La tolerancia impide que el animal elabore anticuerpos contra sí mismo; puede adquirise también, en lo que se refiere a antígenos extraños, si éstos se administran antes del nacimiento o durante el mismo. Al contrario de lo que sucede con la inmunidad, la tolerancia inmunitaria no puede mantenerse, a menos que el antígeno siga presente en el animal. La teoría del molde no se había pronunciado sobre la tolerancia inmunitaria.

En su artículo titulado "Teoría de la selección natural de la formación de anticuerpos" Jerne recurrió a esas objeciones para expesar una idea que con seguridad le habría resultado familiar a Ehrlich: cualquier animal posee un pequeño número de anticuerpos contra todos los antígenos. La respuesta inmunitaria tendría lugar al unirse un antígeno a un anticuerpo e interactuar el complejo antígeno-anticuerpo con los leucocitos, estimulándose la producción y liberación en grandes cantidades del mismo anticuerpo específico. La hipótesis de Jerne se apoyaba en la observación de que el suero sanguíneo normal contenía siempre globulinas, anticuerpos carentes de especifidad, también de naturaleza proteica, y que en un principio sólo parecían diferir de los restantes anticuerpos por su inespecifidad. Jerne citaba asimismo un trabajo de revisión donde Robert Doerr, de la Universidad de Basilea, resumía los datos referentes a la pre-



3. TEORIA DE LA SELECCION CLONAL, que se ganó el favor de los científicos en los años 1960; sostiene que las células productoras de anticuerpos poseen receptores específicos y que cada célula sólo fabrica copias de un anticuerpo. Cuando un antígeno encuentra su receptor correspondiente, se une a él (*1*) e induce la multiplicación de esa célula y la producción de más receptores (*2*). Los receptores se desprenden de la superficie de la célula y pasan a la sangre (*3*).

sencia de anticuerpos "naturales", es decir, anticuerpos generados sin ningún estímulo antigénico.

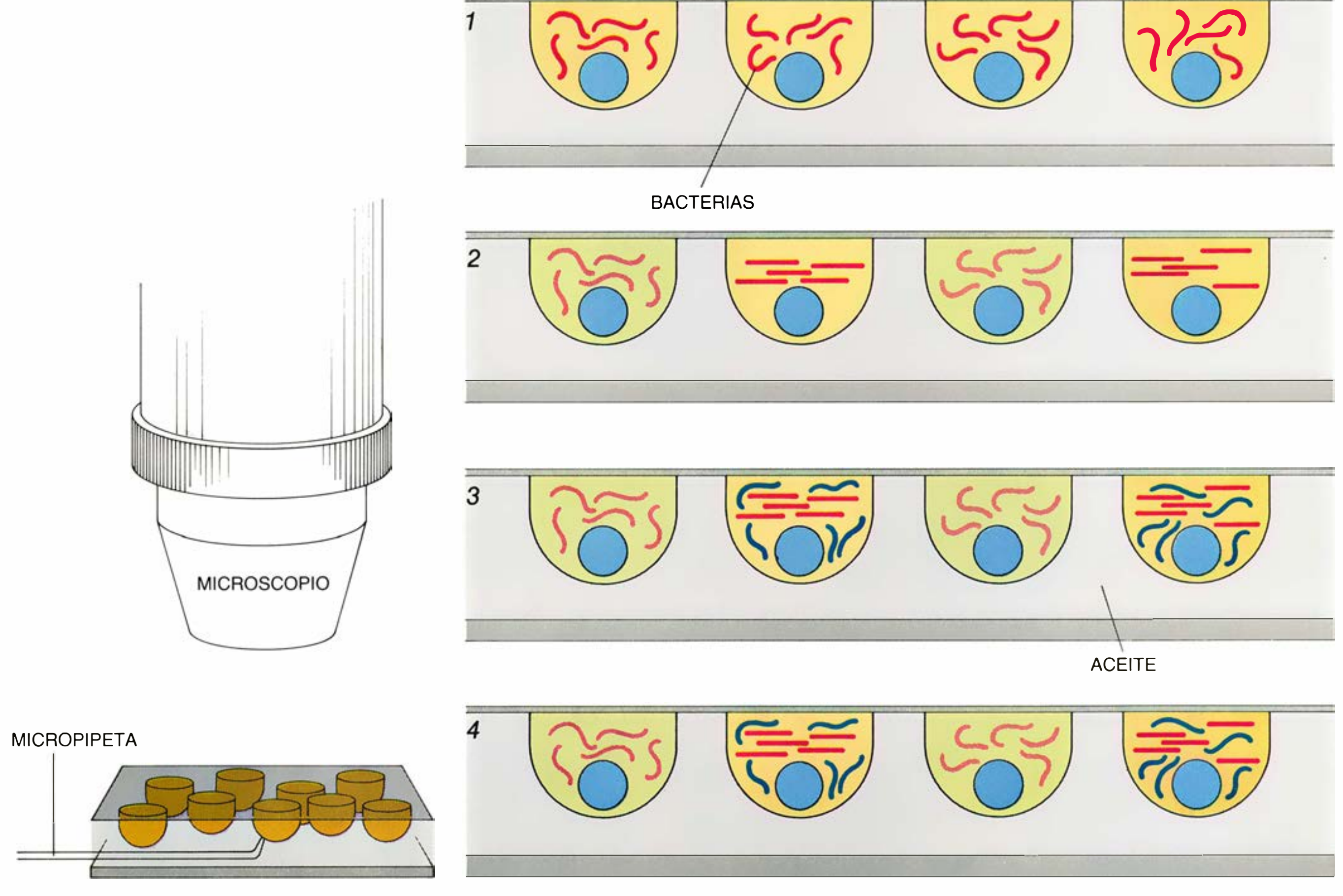
En la Facultad de Medicina de la Universidad de Colorado en Denver, David W. Talmage leyó la hipotesis de Jerne y advirtió sus semejanzas con la teoría de las cadenas laterales de Ehrlich. Talmage fue aún más lejos. En un artículo de 1957 sugirió que, en la respuesta inmunitaria, desempeñarían un papel central células en estado de replicación y moléculas de anticuerpos en libre circulación por la sangre. Las células se seleccionarían para su multiplicación, afirmaba, cuando el anticuerpo que sintetizaban encajara perfectamente con el antígeno invasor. Talmage señalaba también que las células cancerosas liberaban un flujo de anticuerpos notablemente uniforme, señal de que podrían hallarse "especializadas" en la producción de un solo anticuerpo.

Desde la perspectiva actual, no cabe duda de que, en los dos artículos citados, Jerne y Talmage habían establecido las bases de la teoría de la selección clonal de la síntesis de anticuerpos. Quedaba para Burnet poner orden a las ideas, desarrolladas en sus conversaciones con Fenner. Desde hacía algún tiempo andaba dándole vueltas al mecanismo que lograra explicar que el contacto de un antígeno con una célula pusiera en marcha un sistema de autorreplicación. Primero imaginó a los antígenos constituidos en instructores de enzimas adaptativas que, habiendo tomado una vez las medidas al antígeno, podrían después persistir en la síntesis de los anticuerpos en ausencia del antígeno. Después propuso una interacción directa de los antígenos con el material genético de la célula. Tales modelos no cuajaron, pero le llevaron a subrayar la importancia de la función de las células y de su replicación en la producción de anticuerpos.

Selección clonal

Para Burnet, el artículo de Jerne proporcionaba el eslabón que faltaba: el organismo disponía de antemano de anticuerpos capaces de reconocer a todos los antígenos. Recogiendo las ideas de Ehrlich y Talmage, propuso que la unión de un antígeno a un anticuerpo enganchado a su receptor disparaba los mecanismos de la célula que instan a ésta a multiplicarse y sintetizar más moléculas del mismo receptor. Burnet se atrevió a más: postuló que todas las células y sus clones, o descendientes, producirían un tipo de receptor. Y acuñó la expresión de "selección clonal" para a su teoría.

La teoría de la selección clonal le resultaba atractiva a Burnet porque respondía a las objeciones que le planteaba la teoría del molde. El crecimiento exponencial de la producción de anticuerpos tras el contacto con el antígeno resultaría del crecimiento, también exponencial, del número de células productoras de anticuerpos. La reacción secundaria de un antígeno es mucho más rápida y potente que la primera, pues, producida ésta, existirían más células dispuestas a responder tras la estimulación antigénica inicial. Una vez generado un ejército de células que fabriquen un determinado anticuerpo, para mantener la producción del anti-



4. CULTIVOS MONOCELULARES, que han permitido a los inmunólogos determinar cuántos anticuerpos diferentes es capaz de fabricar una célula. Se inmunizaron ratas contra dos bacterias móviles (*rojo*, *verde*); se aislaron células procedentes de sus ganglios linfáticos y se incluyeron en diminutas gotas de medio nutritivo (*izquierda*). Con una micropipeta se introdujeron bacterias en el interior de las gotas (*1*). Cuando una célula inmovilizaba un tipo de bacteria (*2*), se introducía otra del segundo tipo (*3*). Muchas células podían detener el movimiento de uno de los tipos bacterianos, pero ninguna el de ambos tipos (*4*).

cuerpo ya no resulta necesaria la exposición prolongada al antígeno. La capacidad de unión de los anticuerpos mejora con el tiempo porque el antígeno "selecciona", para que se repliquen, las células portadoras de las mutaciones genéticas que promueven el emparejamiento entre antígeno y anticuerpo. Por último, la teoría de la selección clonal explicaba la tolerancia inmunitaria: se trataría de la deleción de un clon de células entero, que ocurriría antes o poco después del nacimiento cuando un antígeno sobrepasara la capacidad metabólica de las células.

Burnet imaginó la respuesta inmunitaria como una especie de microcosmos darwiniano. Las células productoras de anticuerpos, como cualquier otro organismo en un ecosistema, están sujetas a mutación y selección; las más aptas sobreviven; en este caso la aptitud consistiría en el encaje del anticuerpo de una célula en el correspondiente antígeno. En 1957, después de leer la revisión de Talmage, Burnet envió el manuscrito de su trabajo "Teoría de la selección clonal de la formación de anticuerpos" a una revista de escasa difusión. Tal vez el propio Burnet era consciente de los fallos de sus primeras propuestas; por fin, en 1958, comenzó a escribir un libro en el que desarrollaba su teoría y, mucho más tarde aún, publicó sus ideas, ya vertebradas, en revistas de más prestigio.

Burnet desarrolló y defendió con tenacidad la teoría de la selección clonal a lo largo del siguiente decenio. El premio Nobel que se le concedió en 1960, compartido con P. B. Medawar, constituyó el reconocimiento del mérito de sus logros teóricos acerca del fenómeno de la tolerancia inmunitaria, si bien Burnet juzgaba que su éxito más notable había sido, por el contrario, el de promover, tras haberle dado su auténtica trabazón, la teoría de la selección clonal. En 1984 Jerne recibió también el premio Nobel por sus contribuciones teóricas a la inmunología, siendo la más fundamental de éstas la de haber contribuido al desarrollo de la teoría de la selección.

En febrero de 1957, uno de nosotros (Nossal), en calidad de becario de postdoctorado, empezó a trabajar en el laboratorio de Burnet, para investigar los problemas de tolerancia inmunitaria en fetos de ratones. Cuando aquel mismo año Burnet anunció la teoría de la selección clonal, pareció natural sugerir, al modo popperiano, un experimento que intentase su refutación.

Como cualquier nuevo alumno del laboratorio de Burnet, Nossal tuvo que leerse todo lo publicado recientemente acerca de los virus. Le llamaron la atención ciertos trabajos que informaban de que las células utilizadas para obtener virus animales podían aislarse y mantenerse vivas en cultivos monocelulares. El diseño experimental posibilitaba someter a prueba la teoría de la selección clonal. La idea central de Burnet era que una célula produciría exclusivamente un solo tipo de anticuerpo. De lograrse el aislamiento de una célula productora de anticuerpos, cabría determinar si esa célula fabricaba o no más de un tipo de anticuerpo.

¿Una célula, un anticuerpo?

Gracias a una feliz coincidencia, Joshua Lederberg, que a la sazón trabajaba en la Universidad de Wisconsin, pasaba también unos meses en el laboratorio de Burnet con una beca Fulbright. Lederberg, uno de los padres de la genética bacteriana, tenía gran experiencia para atrapar células bacterianas aisladas en el interior de diminutas gotas de caldo de cultivo y así estudiarlas con el microscopio óptico. Lederberg ofreció su colaboración en la realización del experimento; los investigadores planeaban utilizar el movimiento bacteriano como indicador de la producción de anticuerpos.

Según se sabía, las bacterias detienen instantáneamente sus movimientos erráticos al entrar en contacto con anticuerpos contra sus flagelos, delicadas estructuras con aspecto de pelos alargados que impulsan a los microbios. Nossal y Lederberg inmunizaron ratas con dos antígenos flagelares diferentes; unos días después disecaron los ganglios linfáticos de las ratas —estructuras que, junto con el bazo, constituyen los lugares principales de producción de anticuerpos.

Ayudándose de agujas muy finas deshicieron el tejido y prepararon suspensiones de células aisladas, introduciéndolas una a una en el interior de gotas diminutas, de diámetros no superiores a la millonésima de milímetro. Una capa de aceite mineral rodeaba las microscópicas gotas, para impedir su evaporación. Después de un breve período de incubación, se le añadía a cada gotita entre cinco y diez bacterias, que nadaban con rapidez, y se procedía a su observación microscópica. Si las bacterias quedaban inmóviles, lo que denunciaría la presencia de un tipo de anticuerpo, los investigadores introducían bacterias que portaban el otro tipo de flagelo.

Los investigadores comprobaron de ese modo que muchas células fabricaban anticuerpos contra un solo tipo de flagelo, pero que ninguna célula producía anticuerpos contra ambos tipos. Se estableció así la regla de una célula, un anticuerpo, y precisamente con el experimento diseñado para demostrar lo contrario.

Desarme de las reacciones cruzadas

En 1959 Nossal se unió a Lederberg en la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, donde juntos montaron un nuevo laboratorio de inmunología. Durante dos años colaboraron en ese centro con Olavi Mäkelä, de la Universidad de Helsinki, quien confirmó y extendió las conclusiones del grupo de Burnet. Esa colaboración habría de disparar la imaginación de Mäkelä quien, a su vuelta a Helsinki, se centró en el estudio de las reacciones cruzadas, fenómeno en el que los anticuerpos elaborados contra un antígeno reaccionan contra antígenos afines. En sus investigaciones decidió utilizar cultivos monocelulares.

Mäkelä inducía la formación de anticuerpos sirviéndose de virus bacterianos, los llamados fagos. Cuantificó la respuesta inmunitaria de una célula, en lo concerniente a su producción de anticuerpos, por el número de fagos que dejaba fuera de combate, o tornaba incapaces de infectar a su correspondiente bacteria. Antes de ensayar los anticuerpos procedentes de células aisladas, examinó el contingente de anticuerpos del suero sanguíneo de un animal inmunizado. Presenció entonces lo que se afirmaba en las obras de texto: los animales inmunizados con un fago inmunogénico *A* desarrollaban anticuerpos que neutralizaban muy bien el fago *A* y que presentaban asimismo una reacción cruzada con el fago *B* con una eficacia de sólo el 20 por ciento.

Cuando Mäkelä analizó los anticuerpos de las gotas que contenían una sola célula, los resultados fueron muy dispares. Los anticuerpos de cada célula exhibían un grado de especificidad diferente hacia el fago *A*. La mayoría, aunque no los de todas las células, neutralizaba al fago *A* mejor que al fago *B*. Se diría que cada célula fabricaba anticuerpos con propiedades ligeramente diferentes. Las reacciones que Mäkelä

había observado en el suero reflejarían el efecto acumulativo de muchas células, cada una dotada de su propia idiosincrasia y cumpliendo su misión específica. El descubrimiento correspondía precisamente a lo que predecía la teoría de la selección clonal.

Durante los cinco años que siguieron a los experimentos de Nossal, el estudio de la formación de anticuerpos por parte de células aisladas constituyó un campo acotado en el que sólo trabajaron Nossal, Mäkelä y los discípulos que se habían formado en sus laboratorios. En 1963, Jerne y Albert A. Nordin, de la Universidad de Pittsburgh, desarrollaron un método bastante más sencillo para detectar la presencia de anticuerpos segregados por células aisladas. Para ello se extienden sobre una placa de agar recubierta de hematíes de carnero células del bazo y de los ganglios linfáticos de ratones inmunizados con las mismas células sanguíneas. Al añadir ciertas proteínas, aparece una zona clara alrededor de cada célula productora de anticuerpos. La técnica es flexible y bastante exacta para el contaje de células activas. Su asequibilidad despertó el interés de otros muchos laboratorios, decididos a estudiar las cuestiones que la teoría de Burnet había puesto sobre el tapete.

La teoría del molde se viene abajo

Mientras otros investigadores se dedicaban a explorar las predicciones de la teoría de la selección clonal, los autores del artículo comenzaron, en 1962, una colaboración de cinco años, que se inició con un experimento mediante el cual esperaban resolver de una vez por todas la viabilidad de la teoría del molde. Pretendían reseguir la trayectoria de las moléculas de antígeno en su curso por el organismo. A la sazón se había demostrado ya que los anticuerpos, como toda proteína, se fabricaban en unas estructuras especializadas conocidas por polirribosomas. De ser correcta la teoría del molde, cada polirribosoma debería estar asociado a una molécula de antígeno, o al menos a un fragmento importante de alguno. Puesto que cada célula contiene millares de polirribosomas activos, las células productoras de anticuerpos habrían de contener muchas copias de algún antígeno o de sus fragmentos.

Una vez más, nos servimos de los antígenos de los flagelos bacterianos. Les unimos una forma de iodo radiactivo, de tal modo que, para seguir la pista del antígeno o de sus fragmentos "marcados", bastara localizar la radiactividad en las células, o en las muestras de tejidos procedentes del animal inyectado. Ni una sola de las células productoras de anticuerpos contenía una cantidad detectable de radiactividad del antígeno marcado, aun cuando nuestra técnica era suficientemente sensible para detectar hasta diez moléculas de antígeno por célula. Por el contrario, localizamos la mayor parte del antígeno en un tipo celular, el de los macrófagos, que desempeña tareas de limpieza. El dato resultaba difícil-

5. AISLAMIENTO DE CELULAS CAPTADORAS DE ANTIGENOS, que ha permitido demostrar que esas células dan origen a las células productoras de anticuerpos. En una placa de agar que contenía moléculas idénticas de un mismo antígeno se vertieron millones de células de bazo de animales no inmunizados (*1*). Las células portadoras de receptores específicos para ese antígeno quedaron adheridas (*2*); las restantes se eliminaron por medio de un lavado (*3*). Se fundió luego el agar y se dispersaron las células por acción enzimática (*4*), disponiéndose cada célula en un medio de cultivo propio (*5*). Algunas células se pusieron en contacto con el antígeno original (*izquierda*) y otras con antígenos sin afinidad con el primero (*derecha*). Las células tratadas con el primer antígeno se multiplicaron y produjeron anticuerpos (*6*). (Dibujos de Dana Burns.)

mente reconciliable con las predicciones de la teoría del molde.

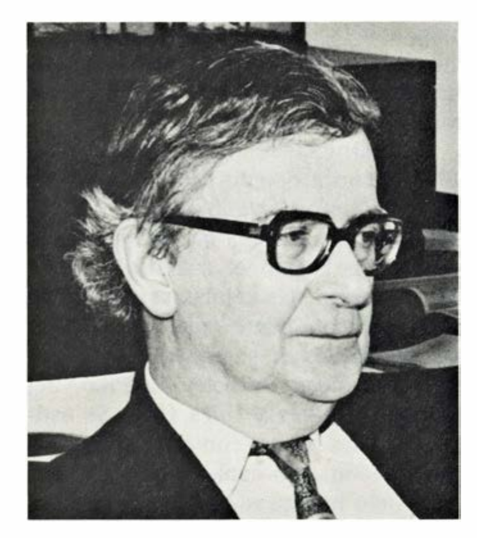
Pese al amplio uso de antígenos radiactivos que hicimos con el propósito de seguir la pista de células inmunológicamente activas, no se nos ocurrió buscar anticuerpos en animales no inmunizados. Sin embargo, uno de los supuestos más controvertidos de la teoría de la selección clonal era que antes de que se produzca la inmunización existe ya un pequeño número de receptores naturales (anticuerpos) para todos los antígenos. Podía haberse argumentado que, siendo su número tan pequeño, los receptores pasarían inadvertidos, con el resultado consiguiente de que algunas globulinas del suero sanguíneo se juzgarían inespecíficas.

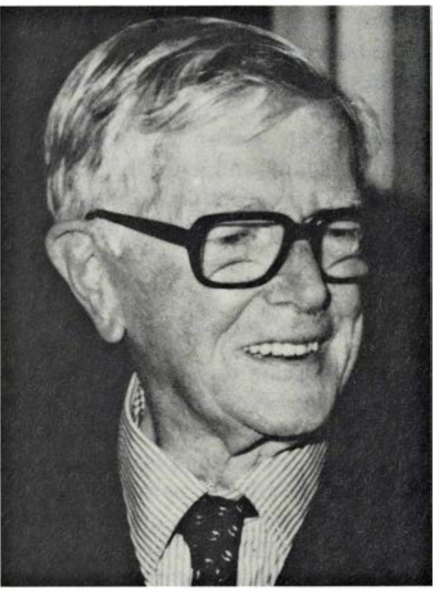
Dos investigadores de la Universidad Hebrea de Jerusalén sostuvieron que la señal radiactiva procedente de los antígenos radiactivos unidos a los receptores debería ser suficientemente intensa para que no escapara su detección. David Naor y Dov Sulitzeanu expusieron células de bazo de ratones no inmunizados a un antígeno marcado y comprobaron si el antígeno se había unido. Suponían, de acuerdo con la teoría de la selección clonal, que un pequeño número de células poseería receptores reactivos para ese antígeno, por lo que sólo esperaban encontrar indicios de radiactividad en un reducidísimo número de células.

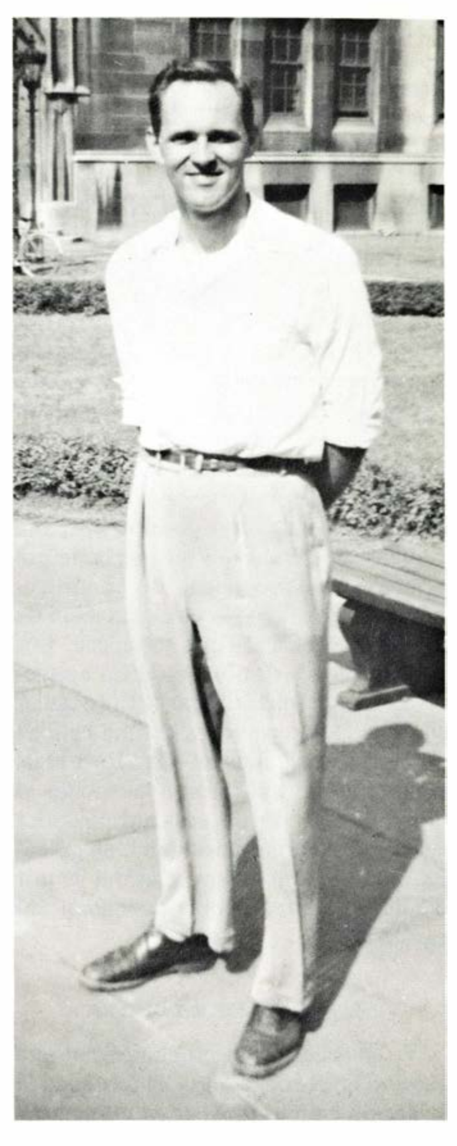
Y eso fue precisamente lo que encontraron Naor y Sulitzeanu. Más aún, como predecía la teoría de la selección clonal, los animales inmunizados poseían más células captadoras de antígenos que los no inmunizados, mientras que los animales tolerantes tenían muy pocas. Naor y Sulitzeanu completaron su experimento en 1967. Su investigación les condujo directamente a una cuestión fundamental: ¿Cómo llegar al convencimiento de que las células captadoras del antígeno eran las predecesoras de las células productoras de anticuerpos?

Suicidio con el antígeno marcado

Uno de los autores del artículo (Ada), junto con Pauline Byrt, del Instituto Walter y Eliza Hall de Melbourne, propusieron un camino para encontrar la respuesta correcta a esa cuestión. Si las células productoras de anticuerpos procedían exclusivamente de las células captadoras de antígenos, cualquier lesión inducida por medio de un antígeno radiactivo en los antepasados de esas células captadoras debería impedir la replicación de las células productoras del anticuerpo específico para ese antígeno. Las demás células no deberían resultar afectadas.







6. LOS TRES DEFENSORES que revitalizaron la teoría de la selección en la década de 1950. Niels Kaj Jerne (*arriba, a la izquierda*) propuso el concepto de antígeno como agente selectivo; David W. Talmage (*derecha*) sugirió que la unión del antígeno era lo que inducía la multiplicación de las células productoras de anticuerpos. F. Macfarlane Burnet (*abajo, a la izquierda*) sostuvo que cada célula producía sólo un tipo.

En 1969, Byrt y Ada llevaron a cabo esos experimentos, denominados de suicidio con el antígeno marcado (*hot-antigen-suicide*). Dos antígenos distintos, aunque semejantes, de la bacteria *Salmonella*, marcados con iodo radiactivo, se inyectaron en dos grupos distintos de ratones. Se transfirieron los linfocitos de esos animales a otros dos grupos de ratones, a los que se había destruido su sistema inmunitario por medio de rayos-X. A continuación se inyectaron los dos antígenos a ambos grupos de ratones, esta vez sin sus marcas radiactivas. El sistema inmunitario sustituto de los ratones irradiados no segregó anticuerpo, o muy poco, en respuesta al antígeno al que se habían expuesto sus linfocitos. Por el contrario, presentaron la vigorosa respuesta habitual al otro antígeno. En otros términos: cuando se lesionaba las células captadoras de antígeno, la respuesta inmunitaria se resentía.

Los experimentos de suicidio con el antígeno marcado confirieron un gran impulso a la teoría de la selección clonal; mientras tanto, Hans L. Wigzell y Birger Andersson, del Instituto Carolino de Estocolmo, habían llegado a conclusiones semejantes, aunque por un camino distinto. Ninguno de los experimentos realizados hasta entonces, sin embargo, podía demostrar de manera inequívoca que la superficie celular poseyera un único tipo de receptores. Los productos de las células aisladas resultaban, a todas luces, mucho

menos heterogéneos que los anticuerpos del suero, pero quedaba la posibilidad de que, si no varios millares, estuvieran representadas 10 o 100 especificidades en la superficie de cada célula.

En 1973, Martin C. Raff, Marc Feldman y Stefanello de Petris, del University College de Londres, intentaron resolver la duda mediante un ingenioso experimento. Algún tiempo antes, Raff había descubierto un producto químico con el que se podían establecer puentes cruzados entre receptores situados en las superficies celulares. El agente químico irritaba la célula de tal modo que los receptores enganchados se encapsulaban en una zona de la membrana celular. De actuar una sustancia de ese tipo con la especificidad de un antígeno, sólo provocaría la encapsulación de los receptores a los que se uniese. Los investigadores disponían de un antígeno de esas características. ¿Encapsularía todos los receptores de una célula? ¿Quedarían algunos en ella? Raff y sus colaboradores aplicaron a leucocitos el antígeno dotado de esas propiedades reactivas y comprobaron que, en las células que reaccionaban, más del 95 por ciento de los receptores quedaban encapsulados.

La prueba sobre el agar

Ya sólo faltaba la prueba oficial que sirviera de coronación de la teoría de la selección clonal. El rigor científico exigía un experimento en el que se pudiera seguir una población homogénea de células captadoras de antígeno desde el momento de su estimulación por parte de éste hasta su replicación y la producción del anticuerpo. Sin embargo, hasta los primeros años 1970, fueron vanos todos los intentos de preparar una población de células sanas, y todas ellas reactivas ante un solo antígeno. Por fin, cuatro o cinco grupos de investigadores, incluido el del propio Nossal, anunciaron la puesta a punto de técnicas prometedoras.

El procedimiento propuesto por el grupo de Nossal aprovechaba las propiedades de fusión del agar y resultaba bastante simple: se acoplaban las moléculas de un determinado antígeno a agar líquido y se permitía la coagulación de la combinación antígeno-gelatina en placas de Petri. A continuación se añadían 100 millones de células procedentes del bazo de animales no inmunizados. Las células específicas para el antígeno fijado se adherían a éste; las células que no se adherían se eliminaban fácilmente mediante un simple lavado. De ese modo aislaron, enganchadas a la gelatina, células reactivas a un solo antígeno.

Liberaron las células específicas para el antígeno acoplado licuando el agar. Desprendieron el antígeno de las células con una enzima que lo arrastra al tiempo que digiere el agar. Ya libres en la disolución, las células se cultivaron independientemente gracias a técnicas desarrolladas en su mayor parte por nuestro colega Beverley L. Pike, del Instituto Walter y Eliza Hall. Se estimularon las células con el antígeno original y con otro cualquiera, a la vez. Tal como habían supuesto, los colaboradores de Nossal comprobaron que las células generaban clones productores de anticuerpos en respuesta al primer antígeno y no al segundo. El medio de cultivo donde se encontraban los clones se enriquecía en anticuerpos correspondientes al antígeno original. No contenía, por el contrario, ningún anticuerpo que correspondiera al segundo antígeno.

El ámbito de la selección

La realización de esos experimentos de clonación resultaba compleja cuando se publicaron por vez primera, en 1976, pero se ha simplificado posteriormente, y ello ha permitido reproducir y confirmar una y otra vez los resultados reseñados. Hoy se acepta como un hecho el concepto de selección clonal y ha quedado firmemente establecida la relación de descendencia directa entre células productoras de anticuerpos y células captadoras de antígenos. Las células captadoras de antígeno son los lifocitos *B*; sus descendientes, las células que componen los clones productores de anticuerpos, son las llamadas células plasmáticas.

Nuestra exposición ha presentado los hechos como si se tratara de una progresión directa desde la conceptualización de la teoría hasta su validación; la trayectoria real fue mucho más compleja. Han quedado sin mencionar muchos experimentos cuyo impacto, tangencial acaso, fue considerable. Las técnicas para transferir el sistema inmunitario sustituto a ratones irradiados con rayos-X, el desciframiento de la propia estructura de la molécula de los anticuerpos y el descubrimiento de las bases genéticas de la diversidad de los anticuerpos contribuyeron, sin ningún género de duda, al éxito definitivo de la teoría de la selección clonal.

La última contribución da respuesta a una cuestión que le ha resultado especialmente espinosa a la teoría de la selección clonal: ¿cómo han podido anticipar los linfocitos la inmensa variedad de antígenos y hacerse con receptores capaces de interceptar a cualquiera de ellos? El propio Burnet reconocía que su teoría requería algún tipo de proceso aleatorio del que no se conocía ningún precedente. Se sabe ahora que el sitio de unión al antígeno de que dispone el anticuerpo es el producto de no menos de cinco genes diferentes, cada uno dotado de regiones variables. A medida que el linfocito se va diferenciando, los genes se recombinan, adoptando un patrón propio en cada célula. Ese patrón dicta la especificidad de los anticuerpos que producirá la célula.

Hemos decidido no abordar la segunda gran familia de linfocitos, las células *T*, que, en vez de secretar anticuerpos, defienden el organismo matando las células infectadas y colaborando en el proceso inflamatorio. Los avances en la investigación sobre los linfocitos *T* han resultado decisivos a la hora de completar el abigarrado cuadro de las múltiples funciones del sistema inmunitario.

En efecto, el proceso de la formación de los anticuerpos es sólo uno de los muchos misterios que hasta la fecha han logrado revelarse. Es mucho lo que se conoce ya acerca del sistema inmunitario en sus niveles bioquímico y genético, aunque haya que admitir que son también muchas las incógnitas que siguen en pie. Sin embargo, una mirada al progreso conseguido nos permite augurar un futuro extraordinariamente halagüeño. Cuando se propuso la teoría de la selección clonal de la formación de anticuerpos parecía algo improbable, casi inverosímil. Los conceptos revolucionarios sugeridos por Ehrlich y formalmente desarrollados por Jerne, Talmage y Burnet no sólo han estimulado un vasto campo de trabajo experimental, sino que han proporcionado también una visión más profunda de aspectos más generales de la función y organización celulares. La solución del problema del origen de los anticuerpos ha influido en el desarrollo de vacunas y en el trasplante de órganos, así como en la química de las proteínas y en biología molecular. Por esa razón, las contribuciones del trío científico que ha propiciado el desarrollo de la teoría de la selección clonal deben contemplarse no sólo dentro de los límites de la inmunología, sino en el contexto global de la biología.

Transistores de arseniuro de galio

Su velocidad de respuesta resulta prometedora para los ordenadores avanzados y los sistemas de comunicaciones. Esta propiedad se estudia representando la energía y el momento de un electrón a través de un cristal del semiconductor

William R. Frensley

La velocidad de los dispositivos de semiconductores tiene importancia decisiva. Los dispositivos más rápidos de los ordenadores actuales pueden conectar o desconectar una corriente en una milmillonésima de segundo. Pero se necesitan más veloces todavía. Esenciales para la fabricación de ordenadores más potentes, tales elementos permitirían también construir nuevos tipos de radares y satélites de comunicaciones capaces de operar en la región de las microondas y a frecuencias incluso mayores.

Para cubrir todas esas exigencias, se están desarrollando nuevas tecnologías de semiconductores en los laboratorios de todo el mundo. Una forma de aumentar la velocidad de respuesta de los dispositivos de semiconductores consiste en reducir su tamaño; con ello disminuye la distancia que deben recorrer los electrones que transportan una señal. Otra forma de obtener mayor rapidez estriba en aumentar la velocidad de los electrones que se mueven por su interior. Las tecnologías que se basan en este método no suelen utilizar como elemento semiconductor el tradicional silicio, sino un semiconductor compuesto, el arseniuro de galio.

Los diseñadores de los dispositivos de arseniuro de galio no pueden confiar sólo en los conocimientos teóricos y experimentales que posibilitan la tecnología del silicio. La distribución de las cargas nucleares y de los electrones en los átomos de los cristales de arseniuro de galio difiere considerablemente de la que presentan los átomos de los cristales de silicio. Los físicos que trabajan con semiconductores han desarrollado formas de representar los efectos de estas diferencias sobre las propiedades ondulatorias de los electrones que se mueven a través de un cristal de arseniuro de galio. Las descripciones se basan en las soluciones numéricas de las ecuaciones mecánico-cuánticas que gobiernan la dinámica de los electrones.

Junto con otras técnicas, estas representaciones permiten interpretar y utilizar las singulares propiedades electrónicas del arseniuro de galio. Entre tales propiedades, ocupa un lugar destacado el comportamiento de los electrones en el interior de un cristal de arseniuro de galio: se mueven allí como si su masa fuera menor que cuando lo hacen en un cristal de silicio. En consecuencia, la presencia de un campo eléctrico de cierta intensidad acelera más a un electrón en el arseniuro de galio que en el silicio. Este efecto y otros efectos mecánico-cuánticos todavía más peculiares que se dan en el arseniuro de galio se aprovechan en la fabricación de dispositivos semiconductores capaces de funcionar a velocidades que resultan inalcanzables en los dispositivos de silicio convencionales.

Para apreciar las ventajas que ofrece el arseniuro de galio, interesa conocer la forma en que se utilizan los materiales semiconductores en los dispositivos electrónicos de estado sólido. El dispositivo más familiar y útil es el transistor; abarca, en realidad, un amplio conjunto de tipos de dispositivos. En su forma más elemental, un transistor consiste en un conmutador electrónico: el flujo de una corriente eléctrica a través del transistor se inicia o se detiene cuando se aplica o se deja de aplicar otra corriente más débil en una región específica del transistor. Por otra parte, el flujo de corriente se puede controlar con gran precisión, de forma tal que las variaciones en la corriente aplicada de baja intensidad producen variaciones en la corriente que fluye a través del transistor. En tal caso, el transistor se comporta como un amplificador electrónico: la corriente intensa que fluye a través del transistor reproduce fielmente las variaciones de la corriente aplicada de baja intensidad.

Uno de estos dispositivos sencillos, el transistor de efecto de campo (TEC), ilustra los factores claves que determinan la velocidad de un transistor. Un TEC consta de dos capas en un solo cristal semiconductor: una capa no conductora sirve de base a una capa conductora, conocida como capa activa, cuyo espesor es de 0,1 a 0,2 micras. La capa activa se convierte en conductora gracias a la inclusión de un número pequeño de átomos de impurezas que actúan como dadores de electrones; estos átomos proporcionan un electrón y quedan cargados positivamente.

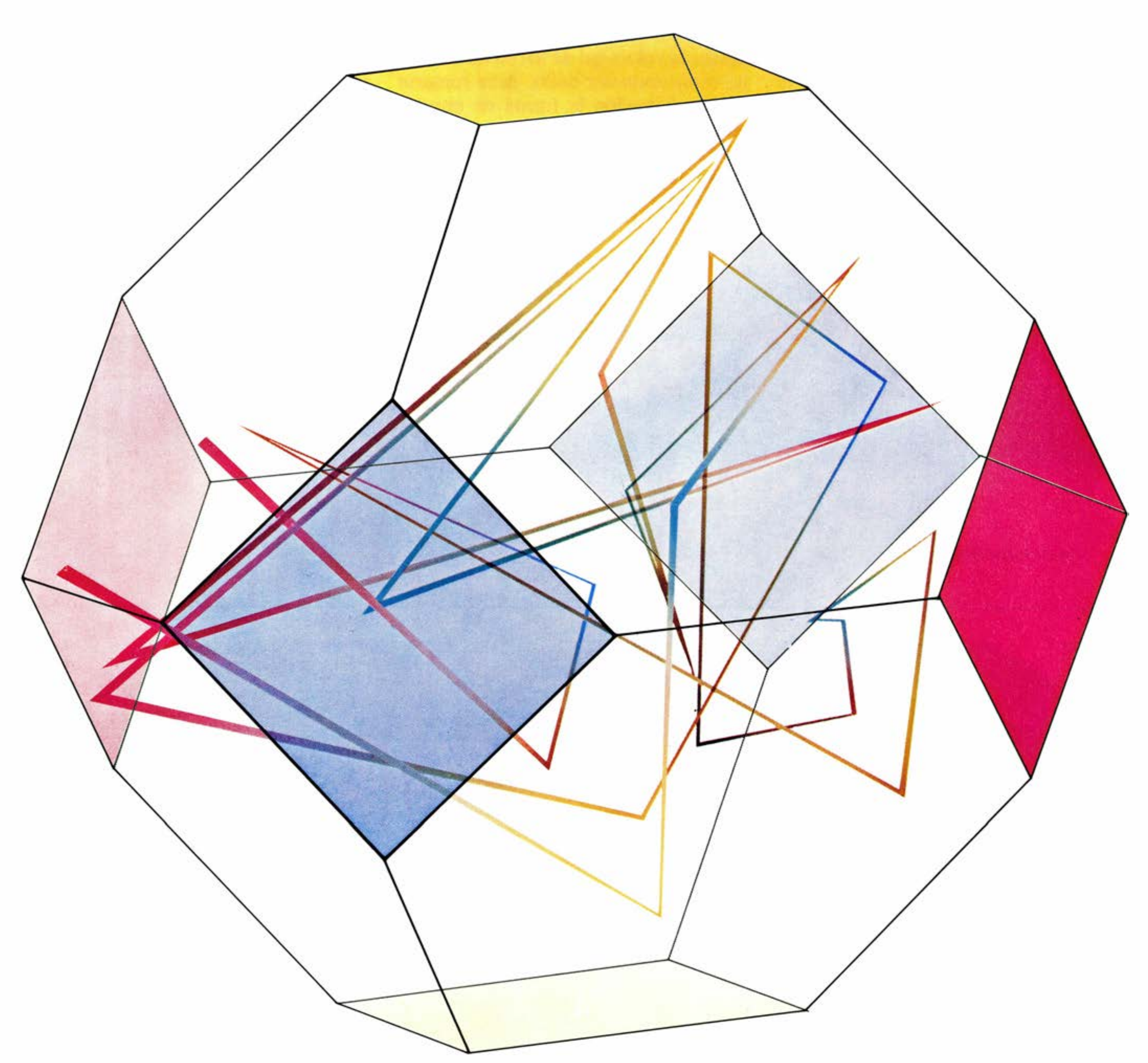
Sobre la superficie de la capa activa hay tres electrodos: fuente, sumidero y puerta; así se les llama. La aplicación de un voltaje entre la fuente y el sumidero crea un campo eléctrico en la capa activa, poniendo en movimiento los electrones de la capa a lo largo de las líneas de campo. Normalmente, el voltaje de la fuente es negativo respecto al del sumidero y, por tanto, los electrones penetran en la capa activa procedentes de la fuente, se mueven a través de dicha capa y se recogen, por último, en el sumidero.

La situación de la puerta posibilita que la unión del electrodo metálico y el semiconductor de base cree la barrera de Schottky, cuya propiedad fundamental consiste en que el nivel energético de los electrones del metal es mucho menor que el nivel energético de los electrones del semiconductor al que está unido. En consecuencia, cualquier electrón que llegue al metal procedente del semiconductor tenderá a quedar atrapado. Sin embargo, los electrones capturados en la puerta son atraídos por los dadores positivos del semiconductor y permanecen cerca de la unión (a distancias inferiores a la diezmillonésima del micrometro), formando una capa de cargas negativas sobre el electrodo. Estas cargas negativas repelen los electrones de la capa activa y originan una capa vacía bajo la puerta: una región de la capa activa sin electrones de conducción.

El espesor de la capa vacía se controla mediante el voltaje aplicado a la puerta. A medida que el voltaje de la puerta se hace más negativo (si por parte del circuito externo se suministran más electrones a la puerta), la capa vacía se va extendiendo progresivamente en la capa activa. Cuando se alcanza cierto valor del voltaje negativo, la capa vacía se extiende a lo largo de toda la capa activa. En este caso, ya no puede circular corriente alguna entre la fuente y el sumidero, y se dice que el transistor está desconectado. Si el voltaje de la puerta se hace menos negativo, la capa vacía se contrae y puede pasar más corriente entre la fuente y el sumidero.

¿Cómo definir la velocidad del transistor? La velocidad en cuestión depende del circuito del que forma parte. En un circuito lógico digital (los incorporados en ordenadores y calculadoras), la velocidad de un TEC constituye el tiempo necesario para que el transistor se desconecte. Se puede demostrar fácilmente que este tiempo es igual al tiempo medio que invierte un electrón de la capa activa en recorrer la longitud de la puerta.

La velocidad de un circuito analógico (los habituales en los receptores y transmisores de radio y televisión) se define de una forma un tanto diferente. La función de un transistor en tales circuitos no consiste en conectar y desconectar completamente la corriente del sumidero, sino en transformar las fluctuaciones pequeñas de la corriente de la puerta en fluctuaciones grandes y análogas a aquéllas en la corriente del



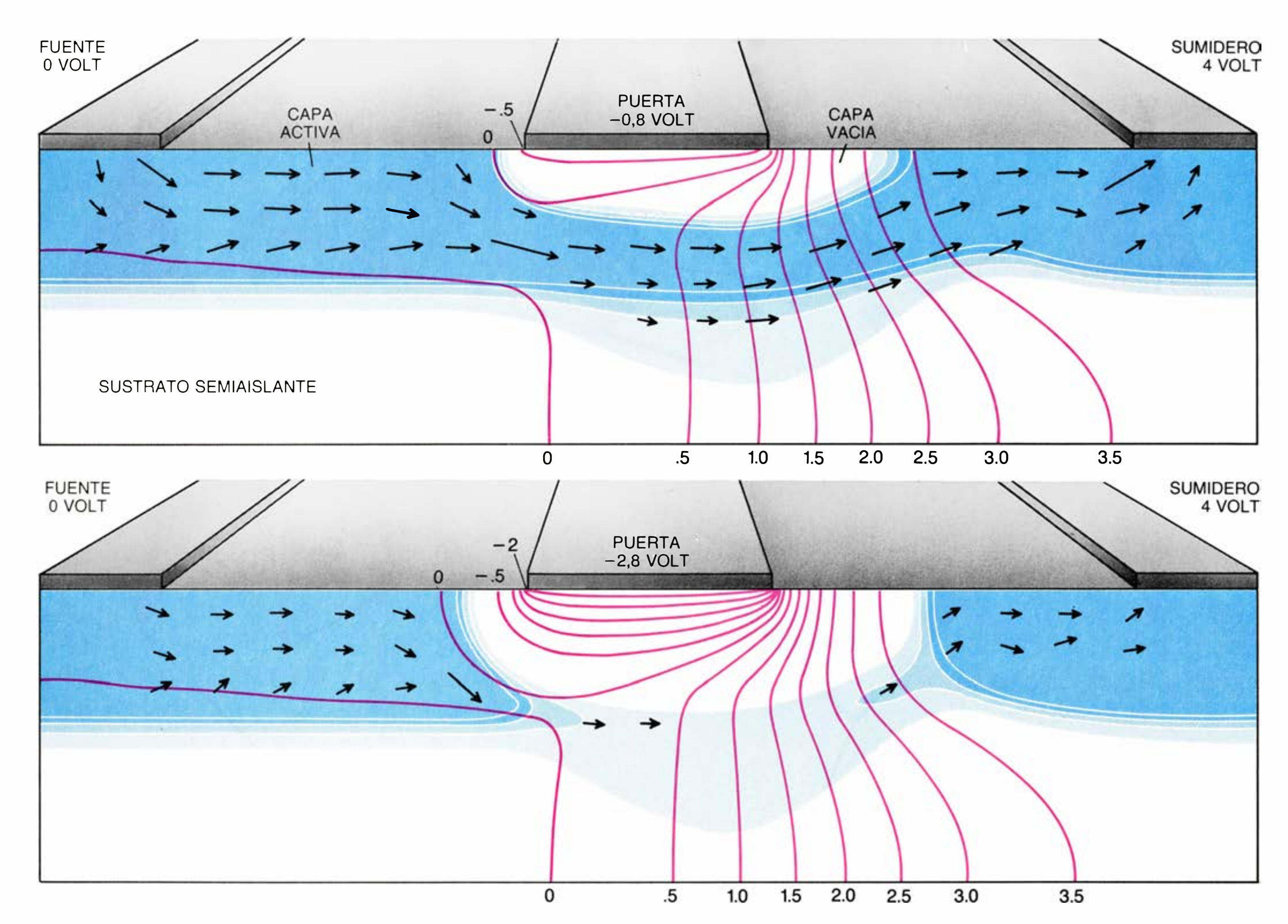
1. TRAYECTORIA SEGUIDA POR UN ELECTRON (*líneas de color*) en su viaje a través de un cristal de arseniuro de galio, bajo la influencia de un campo eléctrico extremadamente intenso: dicha trayectoria puede representarse en función del momento del electrón en tres direcciones perpendiculares. En este "espacio de momentos", el electrón está encerrado en el interior de un poliedro, la llamada zona de Brillouin, que contiene todos los valores posibles del momento. La morfología de las zonas de Brillouin depende de la estructura de la red cristalina; su regularidad geométrica refleja la regularidad de la red. En este caso, el color de un punto en particular de la trayectoria del electrón indica la suma de los componentes de su momento a lo largo de cada uno de los tres ejes representados con colores diferentes. Dado que los átomos de impurezas y los fonones difunden los electrones, su trayectoria parece responder al azar. Pero si se suman las componentes del momento del electrón para cierto tiempo se ve que el electrón se mueve fundamentalmente en la dirección del campo eléctrico. Este dibujo se basa en las simulaciones que realizaron mediante ordenador Hisashi Shichijo, de Texas Inst., y Karl Hess, de la Universidad de Illinois.

colector. En este caso, el parámetro fundamental es la ganancia de corriente del transistor, o amplificación; es decir: la relación entre la corriente del colector y la corriente de la puerta. La ganancia de corriente disminuye conforme aumenta la frecuencia de las fluctuaciones en la corriente de la puerta. La velocidad se define ahora como la capacidad de mantener una ganancia elevada para frecuencias altas. Sin embargo, tanto en los circuitos digitales como en los analógicos, la velocidad exige, ante todo, que el transistor responda con rapidez a los cambios de la corriente de la puerta; la forma primordial de aumentar la velocidad de un transistor en ambas aplicaciones se basa en disminuir la longitud de la puerta, en aumentar la velocidad de los electrones o en ambas cosas a la vez.

El electrodo de la puerta de un TEC basado en el silicio y utilizado en los circuitos integrados actuales tiene una longitud del orden del micrometro. El progreso constante de las tecnologías de fabricación de semiconductores permitirá, sin duda, reducir todavía más el tamaño de la puerta y aumentará, por tanto, la velocidad de los transistores. Pero con el fin de alcanzar las velocidades de operación más elevadas permitidas, será necesario acelerar también la velocidad con que se mueven los electrones a través del transistor. Este objetivo se puede alcanzar fabricando los circuitos integrados con materiales semiconductores diferentes del silicio.

Para comprender qué factores determinan la velocidad de los electrones en un semiconductor dado, debe tomarse en consideración la forma en que los electrones se mueven a través de la estructura del cristal. Cuando se reúne cierto número de átomos para formar un cristal de semiconductor, los niveles energéticos discretos de los electrones que rodean los núcleos de cada átomo se ensanchan hasta constituir bandas de energía. Los niveles energéticos que estaban ocupados por los electrones de valencia, los más exteriores de los átomos, se convierten en lo que se denomina bandas de valencia del cristal.

Los electrones de las bandas de valencia de un semiconductor, que están casi completamente llenas, trenzan la red de enlaces químicos que mantiene la estructura del cristal. Un intervalo de "energías prohibidas", en el que no hay estados electrónicos permitidos, separa las bandas de valencia de las bandas de energía no ocupadas, las llamadas bandas de conducción. Al no intervenir en los enlaces interatómicos, los electrones de las bandas de conducción se pueden mover libremente a través del cristal.

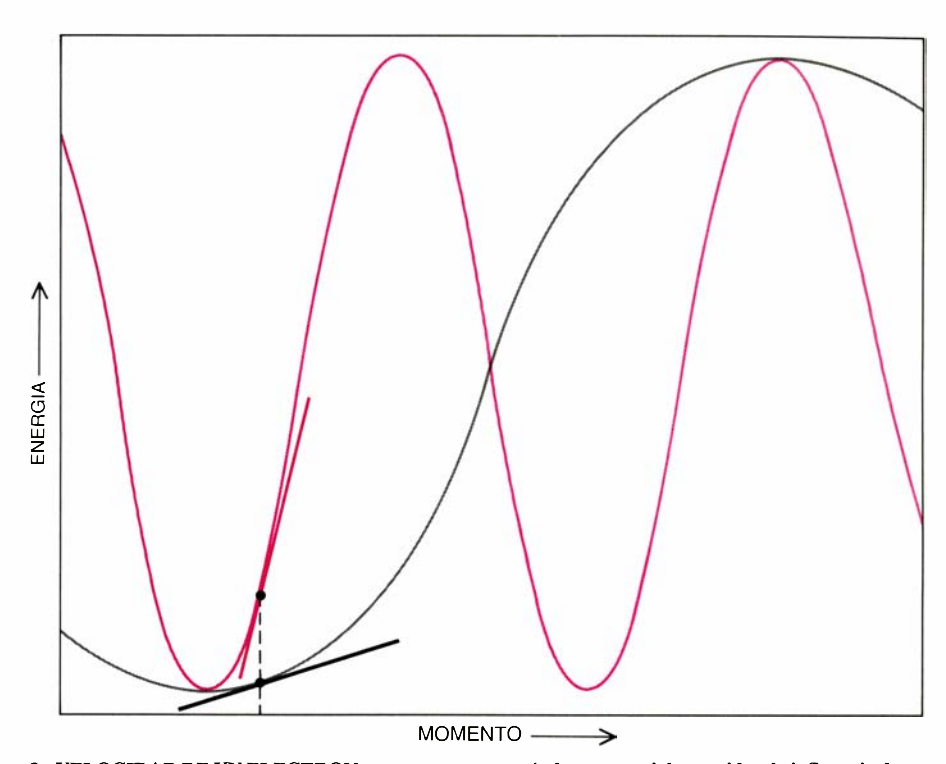


2. TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO: se fabrica con dos capas de material semiconductor; la capa inferior es semiaislante, en tanto que la superior, la capa activa, es conductora. Sobre la capa activa, se disponen tres electrodos metálicos. Los electrones pueden moverse con facilidad entre la capa activa y los dos electrodos exteriores, denominados fuente y sumidero. En virtud de su disposición, el electrodo intermedio —la puerta— tiende a repeler los electrones del semiconductor de base, formando una zona (la capa vacía) en la que no existen electrones de conducción. Cuando se aplica un voltaje entre la fuente y el sumidero (*arriba*), los electrones se dirigen desde la fuente hasta el sumidero a través de la capa activa. (Las líneas de color representan el gradiente del voltaje en incrementos de medio volt; las flechas, la intensidad y dirección de la corriente.) La corriente que atraviesa el transistor se regula ajustando el voltaje aplicado a la puerta, puesto que un voltaje de puerta negativo hará que la capa vacía se extienda hasta una profundidad mayor en la capa activa. Si el voltaje de la puerta es bastante negativo, cesará el flujo de electrones (*abajo*). La densidad de electrones de conducción se pone de manifiesto mediante el sombreado.

De acuerdo con la mecánica cuántica, una partícula, el electrón por ejemplo, puede comportarse como una onda. En particular, podemos considerar el electrón que se mueve a través de un cristal como si se tratara de una onda en propagación cuya longitud de onda se acorta a medida que crece su momento. La energía total de un electrón en un cristal es una combinación de su energía cinética y de la energía potencial resultante de su interacción con todas las demás partículas cargadas que lo rodean. En consecuencia, el estado energético de un electrón depende tanto de su función de onda como de la estructura periódica de la red cristalina, constituida por los núcleos positivos de los átomos integrantes y sus electrones de valencia.

La interacción entre un electrón en un estado determinado y todos los electrones restantes y los núcleos cargados positivamente que existen en el material que lo rodea es demasiado compleja para ahormarla en una representación sencilla. Ahora bien, recurriendo a aproximaciones adecuadas y contando con la ayuda de un ordenador, podemos ilustrar fácilmente la energía de un electrón en función de su momento [*véase la figura 3*]. La forma particular de esta curva refleja las características de la correspondiente interacción. Por otra parte, dado que la pendiente de la curva energía-momento en un punto es igual a la velocidad del electrón en el estado representado por dicho punto, las gráficas energía-momento permiten ver con claridad la dependencia de la velocidad de los electrones respecto de la estructura de bandas de un material: cuanto mayor es la pendiente de la curva, tanto mayor resulta la velocidad. (El momento mecánico-cuántico de un electrón, por su relación con la longitud de onda, difiere del momento clásico ordinario; un electrón en reposo posee todavía una longitud de onda y, por tanto, es posible que un electrón tenga velocidad nula y presente un momento positivo.)

A pesar de su naturaleza mecánico-cuántica, el comportamiento de los electrones de un cristal está gobernado por dos principios fundamentales de la mecánica clásica. El primero de estos principios establece que, cuando una fuerza externa (así la ejercida por un campo eléctrico externo) actúa sobre un electrón, el momento de éste se modifica. Cuando un electrón se somete a una fuerza constante, producida por un campo eléctrico constante, su momento aumenta constantemente. El segundo principio nos dice que el cambio de la energía de un electrón es igual a la fuerza aplicada y multiplicada por la distancia recorrida por dicha partícula.



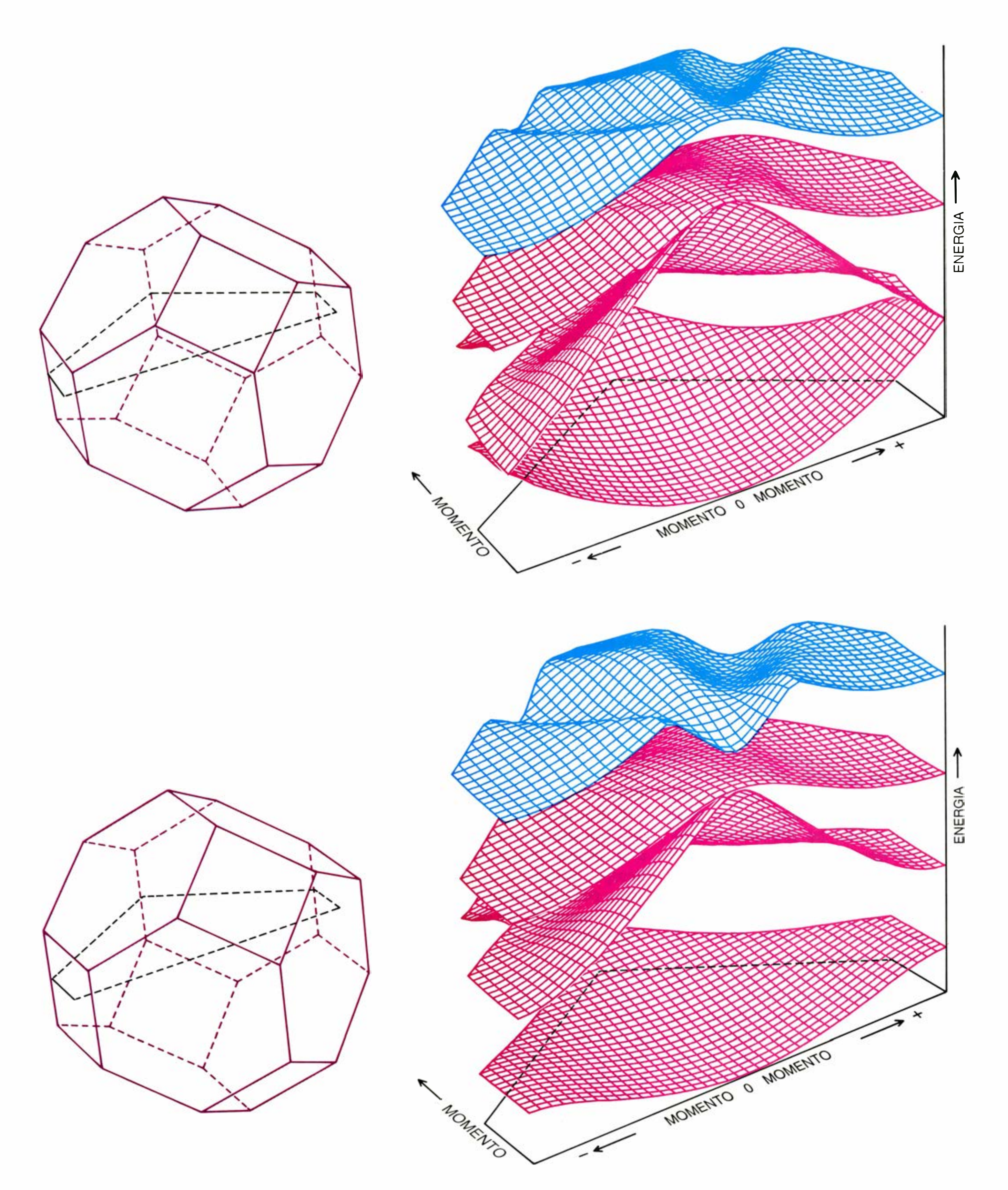
3. VELOCIDAD DE UN ELECTRON que se mueva a través de un material sometido a la influencia de un campo eléctrico. Dicha velocidad puede determinarse a partir de la pendiente de la curva que muestra la relación entre la energía del electrón y su momento. La forma de la curva depende de las propiedades electrónicas del material en cuestión. Cuanto mayor es la pendiente, tanto mayor es la velocidad del electrón. En consecuencia, dos electrones (*puntos*) que se muevan a través de dos materiales diferentes pueden tener el mismo momento pero diferentes velocidades (*pendientes de las líneas tangentes*). Desde el punto de vista de la física clásica, se llama momento al producto de la masa por la velocidad; o en coherencia con ello, los físicos dicen que el electrón que posea una velocidad más elevada tendrá una "masa efectiva" menor.

Si una partícula alcanza una velocidad más alta que otra idéntica sometida a la misma fuerza durante el mismo tiempo, podemos afirmar que la primera partícula tiene una masa menor que la segunda. De hecho, esta misma interpretación de la física clásica se aplica cuando se estudia el movimiento de un electrón en un cristal semiconductor. Para una determinada fuerza aplicada, cuanto mayor sea la velocidad de un electrón, tanto menor será el valor de la magnitud que se conoce con el nombre de "masa efectiva". En términos de las curvas energía-momento, de dos electrones con el mismo momento que se mueven en dos materiales diferentes, el electrón que se mueva en el material cuya curva energía-momento muestre una pendiente mayor poseerá una masa efectiva menor.

A medida que la curva energía-momento se va doblando hacia arriba, la pendiente aumenta y el electrón se acelera. Cuando la curva empieza a doblarse hacia abajo (como lo hace cuando el electrón se acerca a un máximo de energía), el electrón empieza a frenarse. De hecho la velocidad de un electrón es nula en el máximo de la curva energía-momento, pues la pendiente de la curva vale cero en dicho punto.

Si el momento sigue creciendo todavía más bajo la influencia del campo eléctrico, la velocidad del electrón se hace negativa, dado que la curva se inclina hacia abajo. Surge, entonces, una paradoja: cuando aumenta el momento de un electrón en la dirección del campo se eleva su velocidad en la dirección opuesta. En otras palabras, el electrón se mueve en sentido contrario al del campo eléctrico. Una forma de interpretar este comportamiento consiste en decir que el electrón ha adquirido una masa efectiva negativa.

Este sorprendente resultado está relacionado con el alcance finito de las energías de una banda de energía. Si el electrón continuara moviéndose en la dirección del campo eléctrico, proseguiría ganando energía de dicho campo y llegaría un momento en que la energía en cuestión sería mayor que lo permitido por la estructura de bandas. Cuando el electrón empieza a moverse en la dirección opuesta, lo que en realidad hace es devolver la energía que ha recibido del campo.



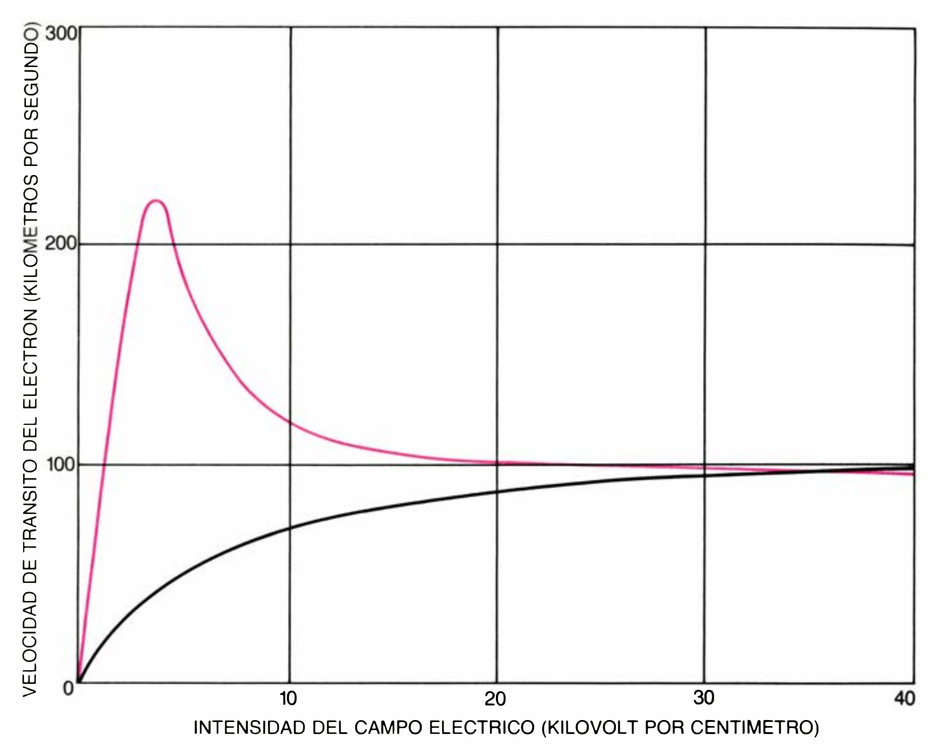
4. DINAMICA DE UN ELECTRON en los cristales de silicio (*arriba*) y de arseniuro de galio (*abajo*). Se ilustra representando el momento del electrón a lo largo de dos dimensiones en una región (*marcada en rojo*) situada en la zona de Brillouin del material; la energía del electrón se representa a lo largo de una tercera dimensión, perpendicular a las anteriores. Las superficies rojas de energía-momento simbolizan los electrones de valencia, o de enlace atómico, que no pueden conducir corriente. La superficie azul representa los electrones móviles de la banda de conducción, que suelen tener su origen en los átomos de impurezas del cristal. La pendiente y la curvatura de la superficie de la banda de conducción indican, respectivamente, la velocidad y la aceleración de los electrones portadores de la corriente. Tales electrones tienden a ocupar los estados de energía más baja de la superficie. En el caso del silicio, los "valles" en los que los electrones son capturados (a ambos lados del borde frontal) presentan una curvatura amplia, poniendo así de manifiesto que la masa efectiva de los electrones de baja energía es grande. Por el contrario, el mínimo de la banda de conducción del arseniuro de galio está situado en el valle central, estrecho; ello indica que los electrones de baja energía de este material poseen una masa efectiva pequeña y, por tanto, pueden alcanzar velocidades más altas que en el silicio, sometidos a la influencia de un mismo campo eléctrico. Los esquemas ilustrados arriba han sido generados por el autor de este artículo, utilizando para ello una técnica desarrollada por Marvin L. Cohen, de la Universidad de California en Berkeley, y por Thomas K. Bergstresser, adscrito al Laboratorio Nacional Sandia.

Desde el punto de vista matemático, conviene combinar la longitud de onda y la dirección de propagación de un electrón en una magnitud única: el momento-vector. De esta forma, se consigue que todos los momento-vectores posibles de todos los estados electrónicos de una cierta red cristalina se sitúen dentro de la zona de Brillouin, un volumen cuyas dimensiones no son longitudes, sino momentos en tres direcciones perpendiculares. La forma de la zona de Brillouin de un material determinado depende más de su estructura cristalina que de su naturaleza química. En la mayoría de los materiales semiconductores, entre los que se incluyen el silicio y el arseniuro de galio, la zona de Brillouin toma el aspecto de un octaedro con los vértices cortados, dando lugar a una figura con ocho caras hexagonales y seis caras cuadradas.

Con la ayuda de un ordenador, el autor ha realizado un análisis de ciertas partes de la zona de Brillouin: secciones bidimensionales donde el momento sólo cambia en dos direcciones perpendiculares entre sí. Limitando así el problema, las bandas de energía del material pueden representarse en forma de superficies cuyos cambios de altura reflejan los cambios en la energía de los electrones [*véase la figura de 4*]. Estas superficies energía-momento son análogas a las primitivas curvas energía-momento, que representan las bandas de energía a lo largo de una sola dimensión del espacio de momentos. La velocidad y la aceleración de los electrones vienen dadas, respectivamente, por la pendiente y la curvatura de la superficie en un punto.

Las cuatro bandas de valencia del silicio y del arseniuro de galio se parecen cuando se ilustran de este modo; la banda más baja presenta un mínimo de energía en el centro de la zona de Brillouin (correspondiente a un momento nulo), mientras que las otras tres bandas poseen una energía máxima en el centro de la zona. La similaridad entre las bandas de valencia de ambos semiconductores refleja la similaridad de los enlaces de la red cristalina en el silicio y el arseniuro de galio.

El funcionamiento de muchos transistores ordinarios se basa en el papel de los "huecos" electrónicos de las bandas de valencia (en lugar de los electrones de las bandas de conducción) como agentes portadores de una señal eléctrica. Los huecos se producen al extraer electrones de la capa de valencia más alta; ello se suele conseguir al introducir en el material ciertos átomos de impurezas con un electrón menos que los átomos de semiconductor correspondientes. Dado que estos huecos o agujeros se comportan como cuasipartículas cargadas positivamente, pueden servir de portadores de carga en los transistores. A pesar de ello, los huecos no resultan adecuados para las aplicaciones de alta velocidad: las bandas de valencia más altas son bastante planas, tanto en el silicio como en el arseniuro de galio. En consecuencia, las masas efectivas de los agujeros resultan grandes e intrínsecamente pequeña, su velocidad.



5. VELOCIDAD DE DERIVA DE UN ELECTRON, o velocidad media de un electrón de conducción; se representa en función de la intensidad de un campo eléctrico para el arseniuro de galio (*color*) y para el silicio (*negro*). Para intensidades del campo inferiores a unos 30 kilovolt por centímetro, la superioridad del arseniuro de galio para transistores de alta velocidad resulta evidente. Sin embargo, para campos más intensos, los electrones de conducción del arseniuro de galio se difunden fuera del valle central y estrecho, hacia otros valles "satélites" más anchos de la superficie de la banda de conducción [*véase la figura 4*]. Dado que los valles satélites se parecen a los valles de la banda de conducción del silicio, la velocidad media de los electrones en el arseniuro de galio se aproxima a la de los electrones en el silicio. (Esquema de Andrew Christie.)

Por encima de las bandas de valencia de un semiconductor se halla el intervalo de energía prohibida, y por encima de este intervalo se sitúan las bandas de conducción. Las bandas de valencia suelen estar totalmente ocupadas por los electrones de valencia; y así, los electrones añadidos al cristal semiconductor por parte de los átomos dadores incorporados en el material deben pasar a ocupar estados de las bandas de conducción, empezando por los estados energéticos más bajos. Es en esta banda de conducción más baja donde se desarrolla el transporte de cargas de alta velocidad.

En el caso del silicio, el estado de energía más bajo de esta banda se encuentra para valores no nulos del momento, es decir, lejos del centro de la zona de Brillouin. Existen seis valores posibles de los momento-vectores (con la misma magnitud, pero con direcciones diferentes) en el mínimo de energía. A cada uno de esos estados les circunda un ancho valle: sus laderas se van curvando de forma gradual, poniendo de manifiesto que los electrones se aceleran lentamente y, por tanto, que su masa efectiva es grande. El valor de la masa efectiva depende de la dirección del movimiento; está comprendido entre el de la masa de un electrón libre fuera del cristal y la quinta parte de este valor.

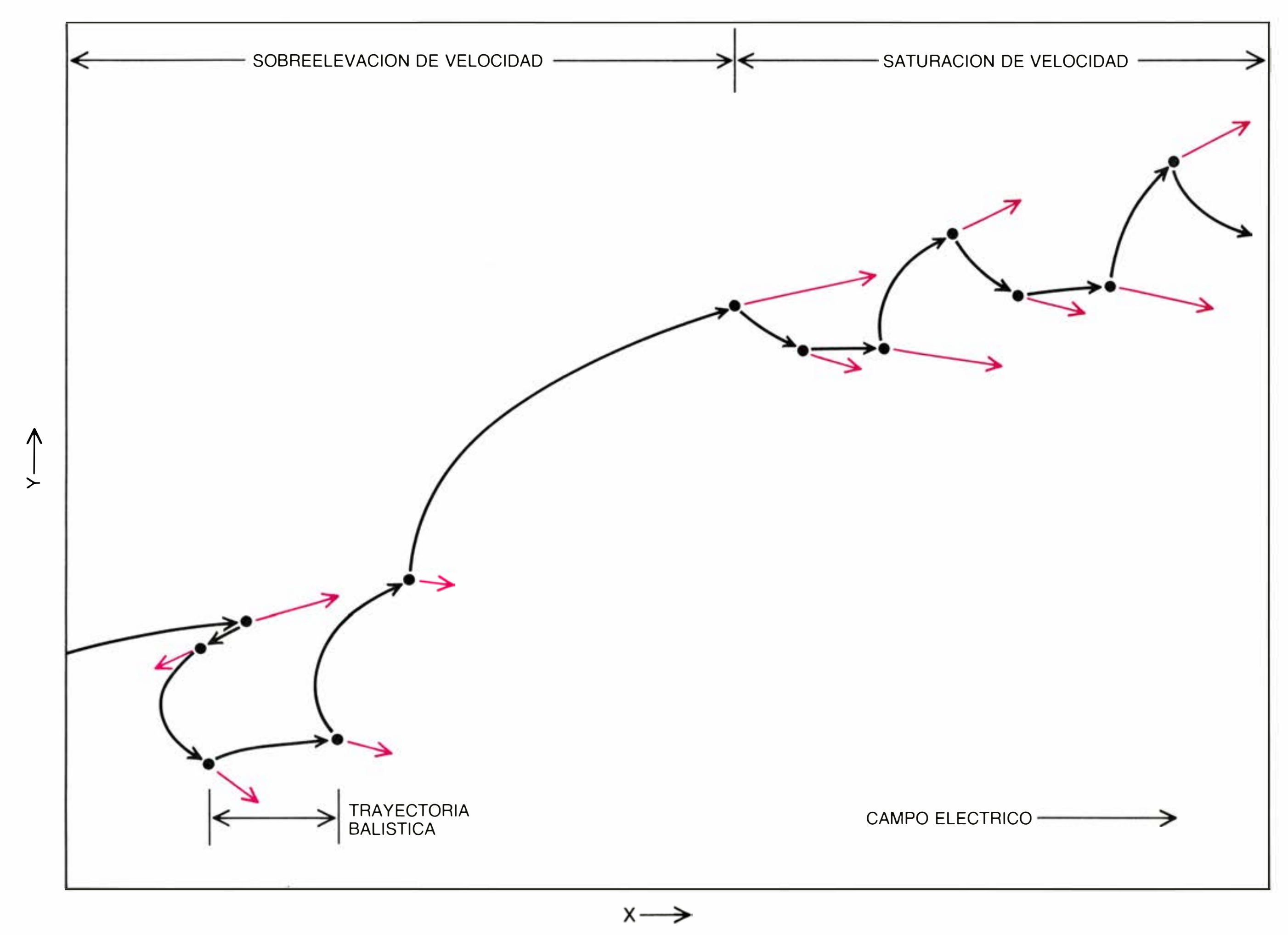
La forma de la banda de conducción más baja del arseniuro de galio difiere de la del silicio, en virtud de la dispar interacción entre los electrones y las cargas nucleares del correspondiente material. La energía mínima se sitúa en el centro de la zona de Brillouin y, por tanto, existe sólo un mínimo. Además, el valle alrededor del mínimo es bastante estrecho, lo que indica que la masa efectiva es pequeña: tan sólo 0,07 veces el valor de la masa del electrón libre. Esta masa tan pequeña es uno de los motivos por los que los electrones se mueven con mayor celeridad en el arseniuro de galio que en el silicio.

La masa efectiva no es el único factor que gobierna el movimiento de los electrones a través de un cristal de semiconductor, pues se trata de un movimiento que no goza de libertad. Los electrones colisionan con las imperfecciones de la red cristalina, los átomos de impurezas cargados, y con los fonones, o vibraciones térmicas de los átomos del cristal. En consecuencia, su movimiento no corresponde a un vuelo libre, sino a una serie de vuelos libres muy cortos (cuya duración es del orden de la décima parte de una billonésima de segundo) entre las sucesivas colisiones. En realidad, el movimiento de los electrones de un semiconductor transcurre en forma de movimiento browniano, al azar. Dado que la aplicación de un campo eléctrico acelera los electrones entre colisiones en una dirección específica, su movimiento se realiza, en promedio, en la dirección del campo. Desde luego, cuanto mayor sea la aceleración de un electrón entre colisiones, tanto mayor será su velocidad media, o de deriva. Por consiguiente, la menor masa efectiva de los electrones en el arseniuro de galio hace que su velocidad de deriva sea mayor.

Por otra parte, esta velocidad media aumenta con la dilatación de los intervalos entre colisiones. También en este sentido resulta ventajosa la forma de la banda de conducción del arseniuro de galio. El número de colisiones por unidad de tiempo depende del número de estados energéticos disponibles en los que un electrón puede difundirse tras una colisión. En el caso del silicio, los seis valles anchos de la banda de conducción proporcionan muchos de estos estados, cerca de la parte más baja de la banda de conducción. El arseniuro de galio, por su lado, posee un número relativamente menor de estos estados, cerca del mínimo de la banda de conducción.

Las consecuencias de la diferente topografía de la banda de conducción entre el silicio y el arseniuro de galio quedan patentes representando la velocidad de deriva de un electrón en función de la intensidad del campo eléctrico en los dos semiconductores [*véase la figura 5*]. Bajo la acción de campos eléctricos débiles, la velocidad de los electrones en el arseniuro de galio aumenta mucho más deprisa que en el silicio. (Este hecho se describe también diciendo que la movilidad de los electrones en el arseniuro de galio es mayor que en el silicio.) La velocidad de los electrones en el arseniuro de galio alcanza un valor máximo del orden de 200 kilómetros por segundo y, a continuación, disminuye hasta la mitad de este valor si la intensidad del campo sigue aumentando. Para que la velocidad alcance en el silicio este mismo valor, se necesitan campos mucho más intensos.

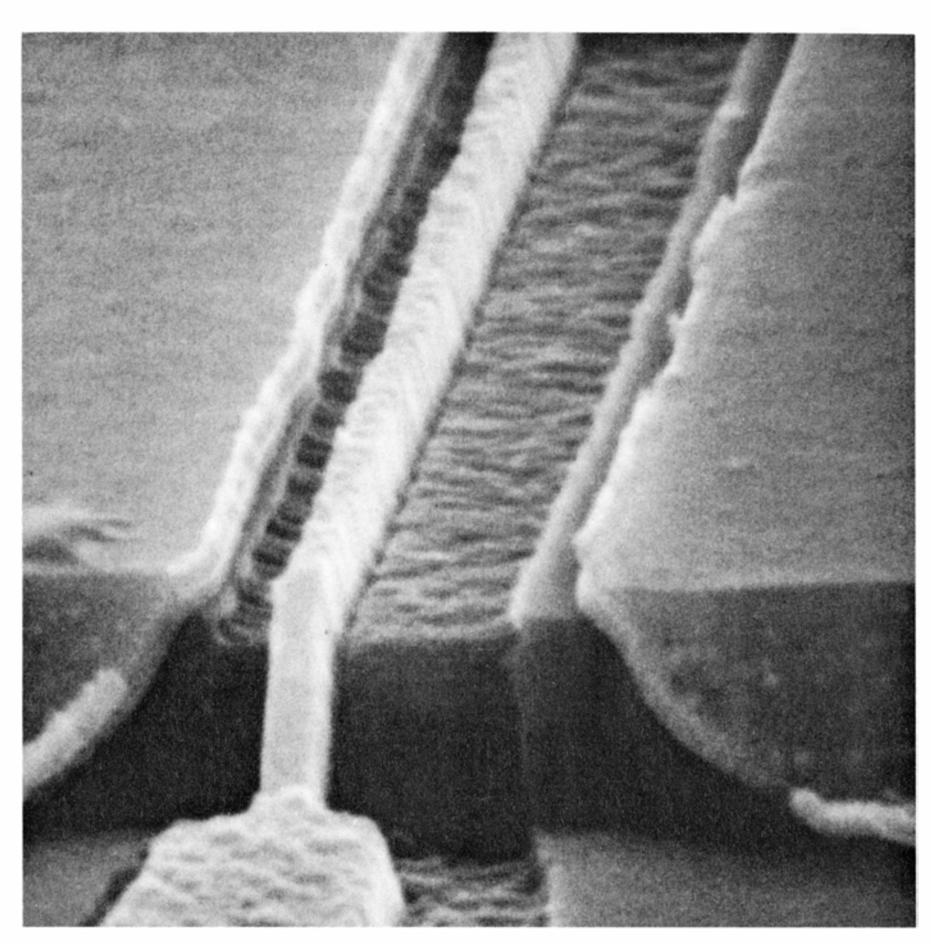
La disminución de la velocidad de deriva de los electrones que se observa en el arseniuro de galio al crecer la in-



6. DIFUSION por fonones (*flechas rojas*); provoca que la trayectoria de un electrón (*flechas negras*) en un cristal semiconductor sometido a un campo eléctrico sea errática. Entre dos difusiones consecutivas, el electrón sigue una trayectoria balística y, por ello, el movimiento de un electrón que sufra pocos procesos de difusión se conoce con el nombre de transporte balístico. El estado inicial de un electrón de conducción en el arseniuro de galio está situado en el valle central de la superficie de energía-momento; allí el valor de la masa efectiva es bajo. Este electrón se acelerará tan rápidamente en un campo eléctrico que alcanzará una velocidad media elevada; no la podrá mantener debido a que, para altas velocidades, el electrón sale del valle central y pasa a un valle satélite. Ahí, su masa efectiva es mayor y, mucho menor, su velocidad media, produciéndose mucha más difusión y alcanzándose un estado de saturación de velocidad.

tensidad del campo eléctrico (fenómeno que se conoce por movilidad diferencial negativa) se puede explicar mediante la topografía de la banda de conducción en el exterior del estrecho valle central: esta región se parece a la banda de conducción del silicio en cuanto posee una serie de valles en los que el electrón tiene una masa efectiva grande. A nadie debe sorprender, pues, que, bajo campos eléctricos más intensos, la velocidad media se aproxime a la velocidad en el silicio. Cuando los electrones se aceleran bajo un campo de intensidad suficiente, adquieren la energía necesaria para difundirse en estos valles "satélite", cuyos estados de energía más baja son algo mayores que los estados de energía mínima del valle central.

Bajo ciertas condiciones, la disminución de velocidad que se produce al aumentar la intensidad del campo eléctrico conduce a oscilaciones espontáneas de corriente, tanto en el arseniuro de galio como en otros compuestos relacionados con él. En este fenómeno se basa el funcionamiento de algunos osciladores de microondas de estado sólido, y se conoce con el nombre de efecto Gunn, en recuerdo de John B. Gunn, de IBM, que descubrió dichas oscilaciones en 1963.



7. TRANSISTOR DE ARSENIURO DE GALIO fabricado por Texas Instruments. Posee un electrodo de puerta (*cresta central*) cuya anchura es de sólo 0,2 micrometros. El electrodo de la fuente está a 0,2 micrometros a la izquierda de la puerta; el sumidero se aloja mucho más lejos, a la derecha de la puerta. Estos dispositivos generan una radiación electromagnética cuya frecuencia alcanza los 115.000 millones de hertz.

Hasta aquí, la discusión se ha limitado a los fenómenos que sugieren la utilización de arseniuro de galio en los transistores de efecto de campo de gran velocidad. Sin embargo, al mismo tiempo que se van desarrollando técnicas industriales de circuitos integrados de arseniuro de galio, se sigue investigando la aplicación de otras propiedades más singulares de este material en el diseño de otros dispositivos de estado sólido. Describiremos dos de estos fenómenos: la sobreelevación de velocidad y el transporte balístico.

En un TEC cuya longitud de puerta sea pequeña, el valor del campo eléctrico en la capa activa varía drásticamente con la distancia; un electrón que se mueva desde la fuente al sumidero se verá sometido bruscamente a una fuerza de aceleración. De hecho, el proceso de aceleración es tan rápido que, antes de que pueda producirse un número elevado de colisiones en las que la energía se pierda, el electrón alcanzará velocidades mucho más elevadas que las registradas a lo largo de grandes distancias bajo campos eléctricos uniformes. Se trata del fenómeno conocido por sobreelevación de velocidad y fue descubierto por Jacques G. Ruch, de los Laboratorios de la empresa Bell Telephone, en simulaciones por ordenador del proceso de transporte de electrones. Las simulaciones mostraron también que ese efecto es mucho más pronunciado en el arseniuro de galio que en el silicio, por ser menor la masa efectiva del electrón y, menor también, el número de difusiones por unidad de tiempo, siempre que el estado del electrón se halle en el valle central de la banda de conducción.

Como resultado de la sobreelevación de velocidad, la velocidad media de los electrones en el arseniuro de galio puede llegar a alcanzar un valor de 500 kilómetros por segundo en distancias de décimas de micrometro. Se cree que la sobreelevación de velocidad constituye la causa principal de la respuesta ultrarápida de la mayoría de los transistores de arseniuro de galio, aunque esta afirmación resulte difícil de demostrar directamente.

El transporte balístico es un fenómeno relacionado con la sobreelevación de velocidad que se produce para distancias todavía más cortas. Consiste en el movimiento de los electrones sin que ocurra una pérdida significativa de energía. Descubierto por Michael S. Shur, de la Universidad de Minnesota, y Lester F. Eastman, de la Universidad de Cornell, este efecto es también consecuencia de que las colisiones no se dan de forma continua; un electrón es capaz de recorrer cierta distancia sin sufrir ninguna colisión. El dispositivo semiconductor puede ser lo suficientemente pequeño como para que la distancia que debe recorrer un electrón sea menor que la distancia media recorrida entre dos colisiones consecutivas.

Se ha observado recientemente el transporte balístico en el arseniuro de galio en los transistores de electrones rápidos [véase "Electrones balísticos en semiconductores", Mordehai Heiblum y Lester F. Eastman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1987]. Se trata de dispositivos semiconductores que tienen una longitud de tránsito extremadamente corta debido a que los electrones se mueven verticalmente a través de capas delgadas de semiconductor, y no horizontalmente a través de la capa activa, como sucede en los TEC. La longitud de tránsito en los dispositivos

de transporte balístico ha llegado a ser de sólo 0,035 micrometros. Hasta ahora, este efecto sólo se ha utilizado en dispositivos experimentales. Todavía queda mucho trabajo por hacer antes de que los transistores de transporte balístico puedan competir con otros dispositivos de alta velocidad.

Aunque resulta evidente que la mayor movilidad de los electrones en el arseniuro de galio representa una ventaja fundamental sobre el silicio, los circuitos digitales de arseniuro de galio servirán para complementar a los circuitos de silicio, y no para reemplazarlos. No es probable que el arseniuro de galio se emplee en la fabricación de pastillas de ordenadores corrientes de bajo coste, pues las pastillas de silicio son bastante más baratas. Sin embargo, muchos sistemas digitales especiales (utilizados en comunicaciones y en algunas aplicaciones militares) poseen componentes electrónicos que necesitan trabajar a las velocidades más elevadas posibles. Los circuitos integrados de arseniuro de galio se incorporarán en estos sistemas, así como en algunos de los superordenadores que se están desarrollando. Ciertos sistemas militares precisan circuitos capaces de trabajar correctamente a temperaturas altas y en presencia de niveles de radiación elevados. Los circuitos de arseniuro de galio se comportan mejor que los de silicio en esas circunstancias.

La nueva tecnología del arseniuro de galio ha tenido ya un gran impacto en circuitos analógicos. Por ser los transistores de silicio demasiado lentos para trabajar bien a frecuencias superiores a los tres gigahertz (mil millones de ciclos por segundo), la utilización de transistores de arseniuro de galio resulta indicada para operar en la mayor parte de la banda de microondas, que se extiende hasta los 30 gigahertz. Si las longitudes de puerta de estos dispositivos pueden reducirse de forma fiable hasta alcanzar el cuarto de micrometro, o un tamaño todavía menor, dichos transistores se convertirán en la tecnología dominante de los dispositivos que operen en la banda de ondas milimétricas, que se extiende desde los 30 hasta los 300 gigahertz y que, en la actualidad, se halla todavía casi inédita.

Los TEC de arseniuro de galio pueden unirse con otros componentes (resistencias, capacidades y autoinducciones) para formar una pastilla única: el circuito integrado monolítico de microondas (CIMM). Con un tamaño de escasos milímetros, puede llevar a cabo funciones que requerían normalmente la utilización de circuitos mucho mayores, constituidos por tubos de vacío y guías de ondas. Se podría fabricar muchos CIMM en una sola pieza, al igual que los circuitos lógicos de silicio actuales, lo que abarataría el coste de fabricación. Gracias a su pequeño tamaño y peso, los CIMM permitirán, por ejemplo, construir sistemas de radar alineados en fase susceptibles de instalarse en un avión. El tamaño usual de estos sistemas es comparable al de un edificio.

Los CIMM de arseniuro de galio contribuirán también a rebajar el coste de los sistemas de microondas actuales, tales como los receptores de emisiones vía satélite. Los receptores baratos de uso doméstico constituyen una parte importante de los sistemas de emisión-recepción directa que diversos países están desarrollando ya. Estos sistemas de comunicación de alcance nacional emiten señales de televisión desde satélites, en vez de las emisiones habituales desde antenas terrestres, y trabajan a frecuencias más elevadas que las utilizadas por los actuales sistemas de comunicación vía satélite. Las longitudes de onda más cortas permiten usar antenas parabólicas más pequeñas (con un diámetro del orden del metro), que resultan mucho más económicas y fáciles de instalar.

Las longitudes de onda más cortas a que operan los transmisores y receptores de arseniuro de galio pueden conducir a nuevas aplicaciones. En ese sentido, ciertas municiones "inteligentes" podrían equiparse con radares miniaturizados que les permitirían alojarse en el blanco tras haberse disparado desde un carro. La antena de uno de estos radares ha de ser extremadamente pequeña, pues tiene que caber en el tubo de cañón del carro. Si pretendemos que el radar posea la suficiente resolución angular para que cumpla su papel de guía, la longitud de onda de la señal de radar deberá ser varias veces menor que el diámetro de la antena. Eso significa que el radar deberá trabajar con ondas milimétricas; los TEC de arseniuro de galio son capaces de generar y detectar tales ondas.

Los dispositivos de arseniuro de galio abrirán, sin duda, una parte considerable del espectro electromagnético a nuevas aplicaciones. En la actualidad, su utilización está restringida al campo militar, pero parece evidente que, a medida que el coste de la generación y detección de microondas vaya disminuyendo, irán surgiendo nuevos destinos comerciales.

Caza de gacelas en la Siria de la edad de Piedra

Hace 11.000 años una banda de cazadores-recolectores sedentarios empezó a sacrificar rebaños enteros de gacelas. La caza continuó hasta un milenio después de la aparición de la agricultura

Anthony J. Legge y Peter A. Rowley-Conwy

Una de las cuestiones fundamentales en arqueología es la de cómo nació la agricultura; cómo y por qué un modo de vida basado en la caza y en la recogida de productos silvestres se vio reemplazado por otro basado en la producción de plantas y animales. El problema, de evidente complejidad, no puede resolverse con los hallazgos de un solo yacimiento. Pero hay algunos que, merced a su emplazamiento y época en que fueron ocupados, pueden servir de ventana para observar el nacimiento de la agricultura.

Uno de estos sitios es Tell Abu Hureyra, situado en la ribera del Eufrates, al norte de Siria. Hace unos 11.000 años, en el período Mesolítico, se instaló allí un grupo de cazadores-recolectores. Y con una sola interrupción siguió ocupado hasta bien entrado el Neolítico subsiguiente. Por ser éste el período en que la agricultura hizo su primera aparición, Tell Abu Hureyra puede ofrecernos valiosa información sobre dicho proceso.

Uno de los descubrimientos más sorprendentes realizados en Tell Abu Hureyra tiene que ver con la caza. Quizás un milenio después de iniciarse allí la domesticación vegetal, la caza seguía desempeñando una función primordial en la subsistencia de la comunidad. Durante ese milenio, la fuente principal de proteínas animales era el sacrificio en masa de gacelas, cuando las manadas emigraban hacia el norte, a principios de verano. Es más: entra dentro de lo posible que esa estrategia de caza no se abandonara hasta que las manadas de gacelas quedaron esquilmadas.

Descubrimientos tan inesperados arrojan nueva luz sobre el comienzo de la agricultura. Abu Hureyra muestra con claridad que una parte del abanico de posibilidades de la agricultura (el cultivo) puede imponerse mucho antes que las otras (la cría de animales). En el intervalo cabe la coexistencia de métodos cazadores-recolectores con los agrícolas. Más aún, durante ese período la caza puede ser superior a la ganadería en la obtención de alimentos de origen animal. Hace falta tiempo para asimilar estas nuevas ideas, pero la labor realizada en Abu Hureyra ha empezado ya a demostrar cuán complejo fue el origen de la agricultura.

El "tell" de Tell Abu Hureyra es una extensa colina artificial que encierra los restos dejados por una ocupación humana de varios milenios de duración. El componente principal del cerro lo forman las paredes de barro desmoronadas de las casas. En Abu Hureyra ese material bastó para formar un resalte de mucho cuerpo: el cerro abarca 11,5 hectáreas y está estratificado en una profundidad de unos ocho metros. Unos once millones de metros cúbicos de restos quedaron encerrados en el tell, que fue excavado en 1972 y 1973 por Andrew M. T. Moore, de la Universidad de Oxford [véase "Una aldea de colonos preneolíticos a orillas del Eufrates", de Andrew M. T. Moore, Investigación y Ciencia; octubre de 1979].

Moore realizó una campaña de urgencia porque Abu Hureyra estaba a punto de desaparecer de la historia. Como consecuencia de la construcción de la presa de Tabqa, en el Eufrates, río abajo, estaba previsto que el tell quedase sumergido en 1974 en las aguas del lago Assad. Ante las prometedoras perspectivas que, desde el punto de vista arqueológico, ofrecía el cerro, se proyectó una excavación pronta, sin perder el carácter sistemático. Uno de nosotros (Legge) colaboró en la planificación de los métodos de recuperación y aportó el utillaje necesario para salvar una cantidad considerable de restos orgánicos, vegetales y animales.

Los restos orgánicos hallados en la excavación reflejan la vida de los pobladores del tell, cuyos hábitos estaban, a su vez, íntimamente ligados al emplazamiento de Abu Hureyra. El cerro se alza en el borde del valle del Eufrates. Por un lado, se halla la llanura anegable del río; por el otro, la estepa seca y horizontal, cubierta de hierba y arbustos de escaso porte. La región recibe, por lo regular, unos 200 milímetros de lluvia al año, lo que la sitúa cerca del límite de la zona en que se puede practicar la agricultura sin regadío.

El clima normal no difiere allí mucho del que dominaba en dicha zona en el 9000 a.C., cuando se colonizó el lugar. (Las fechas de este artículo lo son de radiocarbono sin calibrar.) En tiempos mesolíticos, la aldea pudo tener entre 200 y 300 habitantes. Habiendo empezado a existir hacia 8000 a.C., parece que hubo una laguna en su ocupación, que terminó con una repoblación hacia 7500 a.C., durante el Neolítico (período asociado tradicionalmente con el nacimiento de la agricultura). La población del lugar, en ese período, fue mayor de lo que había sido en la época precedente. La aldea neolítica pudo haber tenido entre 2000 y 3000 habitantes.

Los modernos métodos de excavación empleados en Tell Abu Hureyra permitieron delinear con mucha precisión los cambios producidos en la subsistencia a través del Mesolítico y el Neolítico. Grandes muestras de sedimentos fueron pasadas por máquinas de flotación. Gordon Hillman, del Instituto de Arqueología de la Universidad de Londres, está analizando los restos vegetales reunidos por ese me-



1. POR COMETA DEL DESIERTO se entiende una suerte de corral para matanza en masa de gacelas, construido en Siria, Jordania, Arabia Saudita y el desierto del Sinaí. La fotografía superior muestra una cometa de Dumayr, a unos 30 kilómetros al nordeste de Damasco. Estaba construida probablemente en piedra. Las gacelas eran azuzadas, entre "paredes de acoso" (*abajo*), hacia el gran cercado, donde las mataban cazadores apostados. Había tres cercados pequeños anejos al corral principal. Se ha reemplazado uno por una construcción rectangular (*arriba*). Los círculos pequeños que salpican los muros pueden haber sido escondites para los cazadores al acecho. La fotografía fue tomada en el año 1930 por el Padre A. Poidebard, pionero de la fotografía aérea en Siria.

dio. Toda la tierra excavada se tamizó en una criba de un centímetro de abertura, que retenía los objetos de cierto tamaño, los huesos, por ejemplo. De los 60.000 fragmentos óseos identificables, hemos analizado ya 40.000 en una labor sufragada por el Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas.

¿Qué nos han dicho todos esos huesos? En primer lugar, que, como fuente de proteínas animales, la estepa era un medio mucho más importante que el valle fluvial. Durante el Mesolítico entero y la primera parte del Neolítico, las gacelas son, con mucha diferencia, la especie principal en la dieta de origen animal. Hay más especies representadas: onagros (muy parecidos a los asnos salvajes), ovejas, cabras, cerdos, ciervos y ganado bravo; pero los huesos de gacela forman aproximadamente el 80 por ciento del total. Se trata de la gacela persa (*Gazella subgutturosa*).

Las gacelas no suelen necesitar grandes cantidades de agua ni de pasto verde (hojas tiernas y brotes). Bien adaptadas a las regiones secas, sobreviven con facilidad en la estepa árida. Los cerdos y los ciervos, en cambio, necesitan abrevar a menudo; las reses, las ovejas y las cabras deben beber por lo menos cada pocos días. Todas estas especies prefieren, lógicamente, el valle fluvial a la estepa. Su escasez relativa entre los restos de Abu Hureyra indica que los animales del valle fueron cazándose cada vez menos a principios de la ocupación del lugar, para ir dejando paso a las especies de la estepa en la dieta de sus moradores.

Nuestro análisis de los miles de huesos del tell no sólo revelaron el predominio de la gacela, sino que proporcionaron también muchos datos sobre la captura de estos pequeños y veloces mamíferos. Durante nuestro trabajo observamos que los restos de gacelas incluían los huesos y dientes de individuos muy jóvenes. No estaban representados todos los estadios del crecimiento. ¿Cuáles faltaban?

Los dientes constituyeron una excelente fuente de información, ya que su desarrollo sigue una pauta conocida. Las gacelas persas tienen al nacer (o desarrollan muy pronto) tres molares "de leche" temporales a cada lado de la mandíbula. Estos molares de leche duran algo más de un año, época durante la cual otros dos molares permanentes brotan detrás de aquéllos. Pasado algo más del año, sustituyen los molares de leche por premolares permanentes. Más o menos contemporáneamente, echan el tercer molar definitivo en cada hemimandíbula. Las gacelas se alimentan de herbáceas resistentes, muchas veces mezcladas con tierra y arena; por ello, la corona esmaltada de los molares de leche se ve sometida durante el primer año a un desgaste continuo. Ese desgaste de los molares de leche constituye un buen indicador de la edad de una gacela joven.

Para distribuir por edades las gacelas jóvenes de Abu Hureyra, les medimos el tercer molar de leche. Además de ser el mayor de los dientes de leche, tiene una morfología fácil de reconocer, caracterizada por tres cúspides o superficies de masticación. Cuando medimos las alturas de la cúspide central, observamos que los dientes se podían dividir en dos grupos. El primero no mostraba desgaste, ni estaban formadas del todo las raíces. En el segundo grupo, las coronas esmaltadas habían sufrido un desgaste notable.

Desgraciadamente, la *Gazella subgutturosa* se halla hoy casi extinguida en el Cercano Oriente, y por tanto no se puede verificar allí la comprobación de este guión de trabajo. Pero sí sobrevive en el Turquestán soviético. Desde 1942 hasta 1947, V. G. Geptner, del Museo de Zoología de la Universidad de Moscú, reunió una extensa serie de cráneos de gacelas. La colección de Geptner, instalada en el museo, pudo ser estudiada por uno de nosotros (Legge). La medición de las alturas de las coronas de los terceros molares de leche confirmaron lo que ya habíamos empezado a barruntar: los molares de



2. TELL ABU HUREYRA era una extensa loma de la ribera del Eufrates en el norte de Siria. En primer término aparecen beduinos asentados (no nómadas); los camellos transportan algodón. Gran parte de la loma estaba formada por las paredes de barro desmoronadas de un poblado prehistórico que existió entre el 9000 y el 6000 antes de nuestra era. Los autores sacan la conclusión de que la comunidad prehistórica mataba manadas de gacelas en una suerte de cometa del desierto. El edificio de la colina forma parte de una aldea cercana. El agujero y los montones de tierras se deben a una excavación a comienzos de la década de 1970. Después de excavada, la loma quedó sumergida a consecuencia de la construcción de una presa en el Eufrates. (Fotografía de Gordon Hillman.)

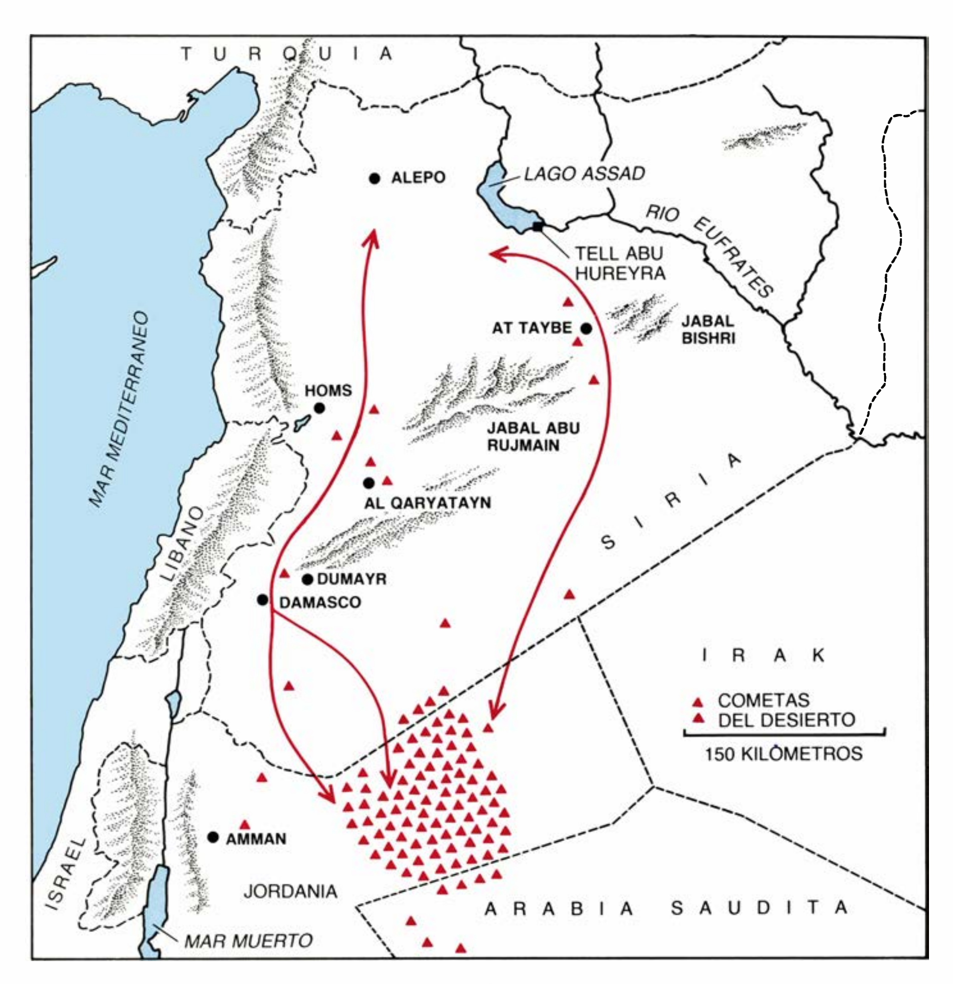
leche no desgastados pertenecían a recién nacidos, mientras que los dientes desgastados correspondían a individuos matados al año de edad.

Ese descubrimieno se confirmó al investigar el desarrollo y la soldadura de los huesos de las extremidades. El calcáneo, o hueso del talón, era el elemento idóneo para nuestros fines. El calcáneo forma parte del talón; ahora bien, la gacela se apoya al andar sobre sus dedos principalmente, por lo que el talón viene a quedar bastante lejos del suelo. Igual que el tercer molar de leche, el hueso del talón es una pieza de fácil identificación, que evidencia con nitidez las fases de su crecimiento. Así, la caña del hueso se alarga y ensancha considerablemente durante el primer año de vida; también, al alcanzar el catorceavo mes de edad la apófisis (el saliente pequeño al que se liga un tendón), que empieza siendo una pieza ósea separada, se suelda a la estructura principal.

Los huesos de las gacelas jóvenes corroboran lo observado en los molares de leche. Un grupo de talones correspondía a ejemplares pequeños, con la apófisis sin soldar; éstos procedían de individuos recién nacidos. Un segundo grupo tenía también la apófisis sin soldar, pero los huesos eran casi tan grandes como los huesos de los adultos; perteneían a los añojos. El grupo más numeroso estaba formado por huesos desarrollados, con la apófisis totalmente soldada; correspondían a las gacelas adultas. (Análisis posteriores de los dientes permanentes confirmaron la presencia de adultos, así como de recién nacidos y añojos.)

¿A qué obedece la repartición de huesos entre recién nacidos, añojos y adultos? Parte de la respuesta se encierra en el ciclo vital de la manada de gacelas: altamente sincronizado, todos los nacimientos se producen en un período corto. Si se caza la manada en una misma estación, año tras año, los animales sacrificados presentarán también una distribución característica, por edades, que incluirá grupos de animales jóvenes separados por un año de edad. Eso es lo que debió acontecer en Tell Abu Hureyra: la matanza era una operación estacional. La presencia de recién nacidos entre las capturas indica que la temporada de caza tenía lugar después del parto de las hembras. Los relatos de los primeros viajeros europeos cuentan que las gacelas de las proximidades de Abu Hureyra parían a finales de abril o comienzos de mayo.

Además de la estacionalidad de la matanza, sucedía que el objeto de la caza era la manada y no los individuos.



3. EMIGRACIONES DE GACELAS en Jordania y Siria. Se producían sobre un eje de norte a sur. Fundándose en la distribución de las cometas del desierto y en otros testimonios (de relatos de viajes, principalmente) los autores reconstruyeron dos rutas (*color*). A fines de la primavera, las gacelas se trasladaban al norte, y allí nacían las crías; a fines de verano, regresaban al sur. La ruta del oeste es hipotética. La vía oriental termina cerca de Tell Abu Hureyra, donde las manadas eran cazadas en abril y mayo.

La distribución de los huesos del tell hace muy improbable que procediesen de presas sueltas. Cuando los cazadores acorralan una manada y seleccionan la futura presa, cobran animales jóvenes, por lo general en óptimas condiciones, machos en su mayoría. En Abu Hureyra, en cambio, encontramos huesos de todas las edades, incluso de los muy jóvenes y de los muy viejos. Esa pauta era, sin duda, el resultado de una estrategia cazadora en la que se sacrificaba la manada entera a la vez.

Los métodos de matanza en masa son muy conocidos en la prehistoria y entre cazadores-recolectores de épocas históricas, como los indios de las Llanuras de América del Norte. Los indios de las Llanuras empleaban varios procedimientos para adueñarse de manadas de bisontes y antílopes. Todos ellos tenían en común un mismo desarrollo: se forzaba a la manada hacia un recinto o una trampa simulada, donde podía ser sacrificada con facilidad. En algunos casos, los animales desfilaban entre paredes de acoso que convergían en un destino elegido por los cazadores.

Las ventajas que a un grupo de cazadores reportan tales métodos dependen de varios factores. El sacrificio en masa es, ante todo, una estrategia de campo abierto, donde la presa apropiada la ofrecen grandes manadas. Se precisan muchos cazadores para llevar el grupo a campo través y accionar las trampas en que se realiza la matanza. Estos tres requisitos (campo abierto, grandes manadas y muchos cazadores) los reunía Abu Hureyra en el período Mesolítico y Neolítico inicial.

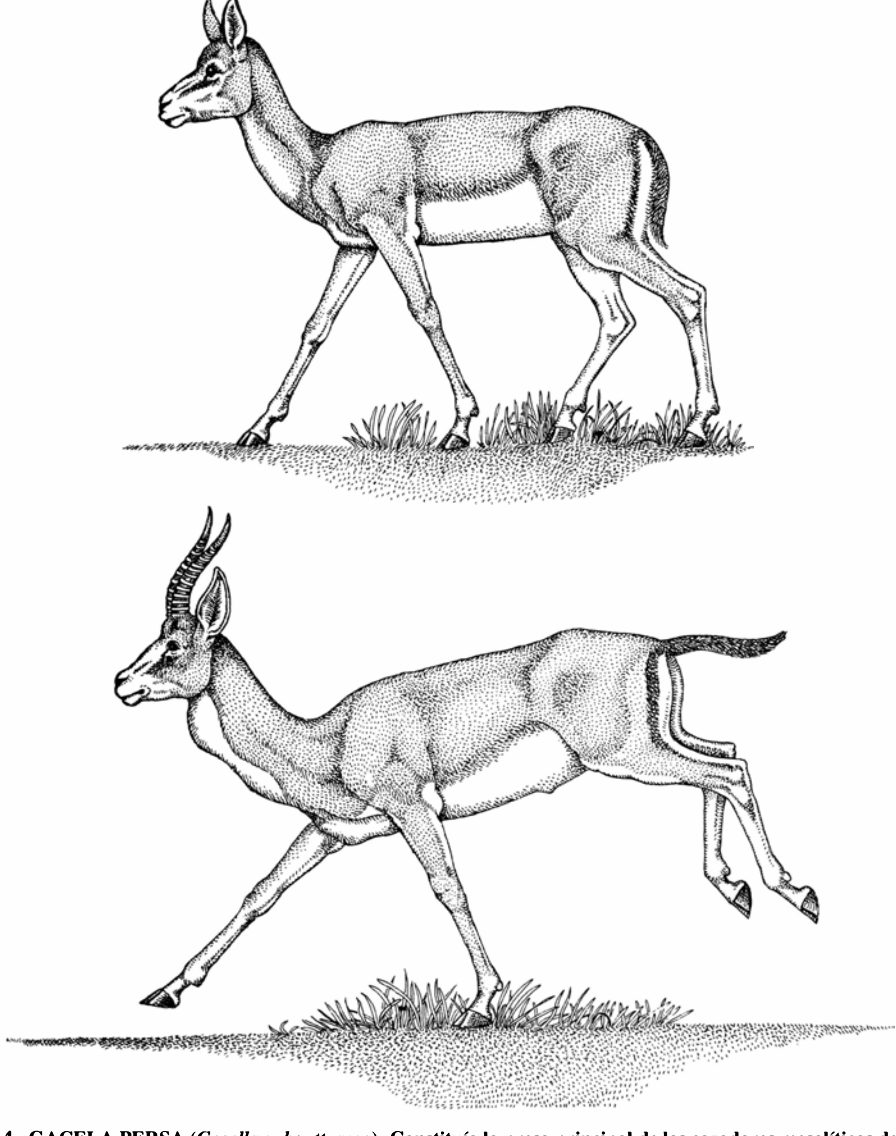
No obstante la rica documentación disponible sobre las estrategias del sacrificio en masa en América del Norte, no se les prestaba, hasta hace poco, la debida atención en el Cercano Oriente. Así, en los últimos años los arqueólogos han comenzado ya a percatarse de la existencia de lugares habilitados para la caza de gacelas, repartidos por Jordania, Siria, Arabia Saudita y desierto de Sinaí. Esa suerte de corrales de la muerte se siguieron utilizando hasta hace poco –viajeros europeos los vieron en uso en nuestro si-

glo XX–, pero al principio no estaban claros ni su difusión ni su destino. Su gran dispersión no fue advertida hasta que se implantaron las líneas de correo aéreo, y los pilotos comenzaron a fotografiar los yacimientos arqueológicos. En 1929, el capitán de grupo, L. W. B. Rees, piloto de la línea Cairo-Bagdad, publicó el primer reportaje en la revista *Antiquity*. Rees denominó a esas estructuras "cometas del desierto", por su supuesta semejanza con una cometa de niño vista desde el aire.

Si bien varían de forma y tamaño, las cometas del desierto comparten ciertos elementos. Suele haber en ellas un recinto central, que puede oscilar entre unos metros y 150 metros de diámetro. El recinto tiene una entrada angosta, a partir de la cual divergen muros de piedra, muros que pueden extenderse varios kilómetros a través del desierto. En algunas cometas, el cercado y las paredes se componen de grandes losas de piedra puestas de canto; en otras, están hechas de pedruscos amontonados.

Rees y los observadores que le siguieron en las décadas de los años 30 y 40 eran militares y dieron a las cometas una interpretación castrense: creyeron que se destinaban a la defensa de personas y de ganado. Pero luego se vio su verdadera misión de encerrona para la matanza en masa. El extremo abierto de la U formada por sus paredes se encuentra, por lo común, cerca de valles pequeños, paso obligado de las manadas de gacelas. Los cazadores empujaban los animales hacia la entrada; aterrados, iban en estampida hacia la cerca amurallada donde les esperaba la muerte, lugar que a menudo estaba oculto detrás de un montículo.

Según la reciente labor arqueológica y los relatos de los viajeros, la cometa funcionaba de dos maneras de acuerdo con su emplazamiento y su material.



4. GACELA PERSA (*Gazella subgutturosa*). Constituía la presa principal de los cazadores mesolíticos de Tell Abu Hureyra. El macho (*dibujo inferior*) alcanza los 60 centímetros en la cruz. La gacela persa, sometida a una caza abusiva reciente, se halla actualmente extinguida en estado de libertad en Jordania y Siria.

En Jordania, predominaban las rocas basálticas de la lava que cubre buena parte del norte y del este del país. La cerca de la matanza presenta en sus paredes de piedra unos escondites circulares, pequeños, parecidos al brocal de un pozo. Svend H. Helms, del Instituto de Arqueología de la Universidad de Londres, supone que los cazadores se apostaban allí, a la espera de alcanzar con sus arcos y flechas las gacelas azuzadas.

En Siria, donde el suelo no está cubierto de antiguos torrentes de lava, se adoptó otro sistema, consistente en cavar zanjas por fuera del cercado principal. J.L. Burckhardt, que viajó por el Cercano Oriente en el siglo XIX, asistió a esas cacerías junto a la aldea de Al Qaryatayn. En la parte de la cerca, cuenta, había desniveles por donde las gacelas saltaban, cayendo a los fosos contiguos. Las gacelas heridas en las trampas eran rematadas a renglón seguido. Se amputaban las extremidades. La carne se salaba y secaba para almacenarla; el sobrante se consumiría sin duda durante buena parte del año.

Parece evidente que hubo un corral semejante en Abu Hureyra, durante los milenios en que se acumularon las grandes cantidades de huesos. Es más, la cometa quedaría cerca de la aldea. Nuestra colección encierra un buen muestrario de todos los huesos del cuerpo. Los huesos de las extremidades no están infrarrepresentados, como lo estarían de hallarse la cometa muy alejada del poblado. Las referencias históricas indican que, cuando las gacelas eran descuartizadas en parte antes del transporte, los huesos de las extremidades quedaban abandonados en el lugar de la matanza.

No tenemos todavía ninguna prueba directa de la ubicación del corral. Cuando se realizó la excavación del tell, nadie esperaba encontrar testimonios de caza, a una escala tan grande, en una comunidad que comenzaba ya a dedicarse a la agricultura. Por tanto, no se investigó el lugar buscando señales de la cometa. Lo que no significa que esté todo perdido. El tell ha quedado sumergido, pero no bastante superficie de sus alrededores. Del examen de la topografía se pueden inferir con fundamento dónde pudo establecerse la cometa. En un futuro próximo nos proponemos regresar a Abu Hureyra para hallarla.

Esas lagunas arqueológicas no nos privan de sacar conclusiones sobre la matanza en masa y su adaptación a unos patrones ecológicos y sociales más amplios. Empecemos por el movimien-

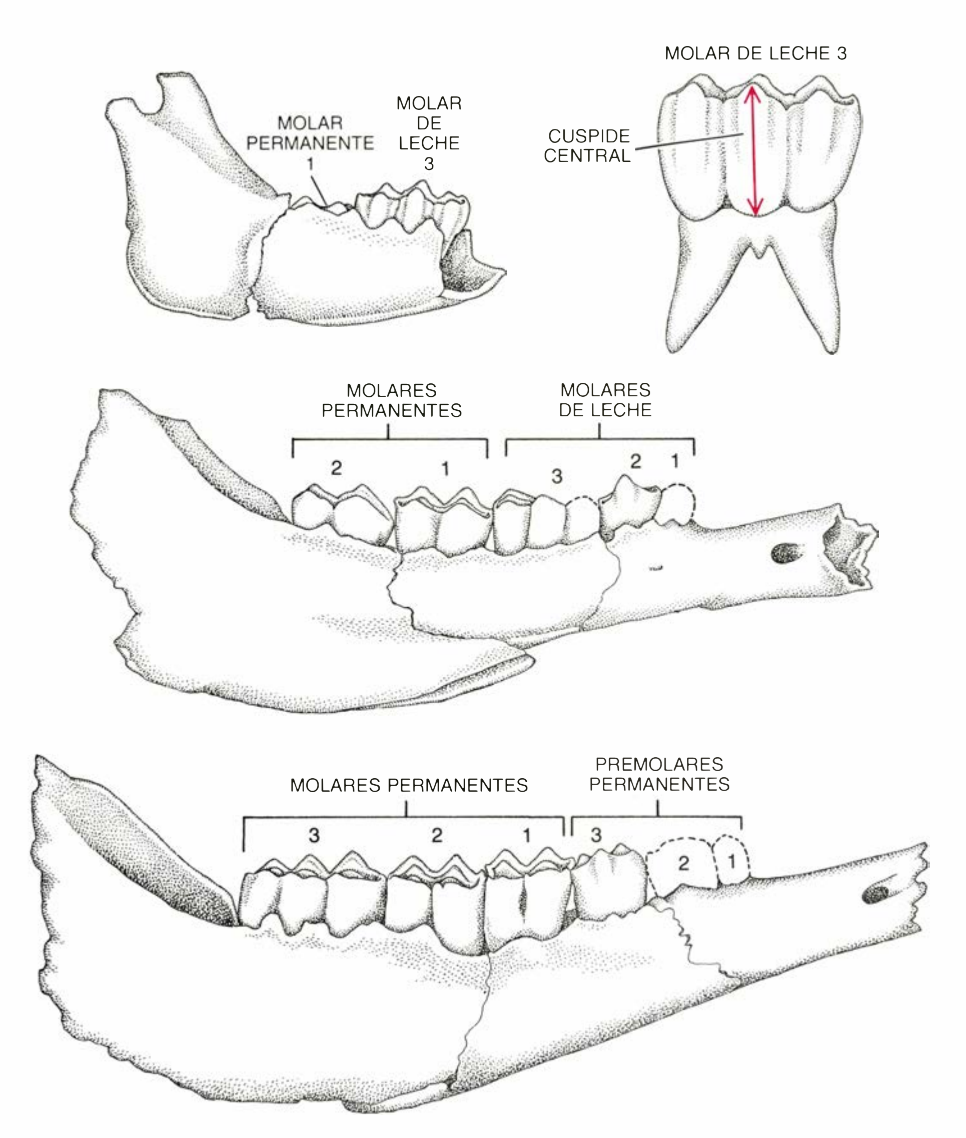
to estacional de las manadas de gacelas. Como prueban los restos desenterrados, las gacelas eran sacrificadas en Tell Abu Hureyra durante un breve período del comienzo del verano, época que coincide, probablemente, con el punto de máxima expansión hacia el norte de la emigración anual.

La gacela persa se ha adaptado, con extraordinaria eficacia, a las condiciones de aridez. Consigue el agua que necesita comiendo las plantas empapadas de rocío. Hay, sin embargo, una excepción por lo menos en esa regla: para producir leche, las hembras deben tener acceso al agua o a hojas, tallos y brotes verdes. De ahí su emigración hacia el norte, fuera del desierto, durante la primavera. Una vez alcanzado un medio un poco más húmedo, en las cercanías del valle del Eufrates, las hembras preñadas parían. Las colonias pasaban unos meses en su territorio del norte antes de dirigirse otra vez al sur en el mes de julio.

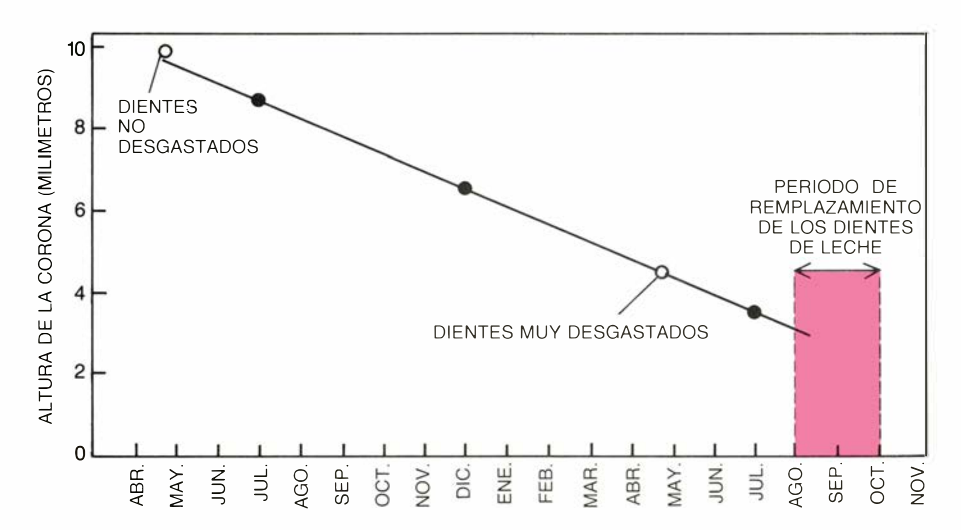
La topografía de la región, los relatos de los viajeros y la distribución de las cometas del desierto indican que las manadas tomaban dos rutas principales en sus emigraciones anuales de norte a sur. Una ruta occidental (algo conjetural) seguía el valle que se extiende en dirección nordeste, desde Damasco hacia el distrito de Holms, situado al oeste de la serranía de Jabal Abu Rujmayn. Las cometas vistas por Burkhardt se ajustan a esa ruta.

La otra vía, mejor documentada, se encuentra al este de la Jabal Abu Rujmayn. Entre esa sierra y la vecina, llamada Jabal Bishri, corre un desfiladero que era utilizado antaño por las caravanas en la ruta de Alepo al golfo Pérsico. Como señala con claridad la documentación histórica, las manadas utilizaban también este paso. Al norte mismo del desfiladero se halla la aldea de At Taybe. Allí, en 1604, Pedro Teixeira, un viajero portugués, vio cometas donde se sacrificaban gacelas. Esos corrales diferían de los observados en otros lugares de Siria y de Jordania. En vez de paredes de acoso de piedra, tenían hileras de gallardetes de trapo, colgados de postes delgados. Las gacelas, asustadas por el movimiento de los gallardetes, eran empujadas entre los postes hacia el cercado.

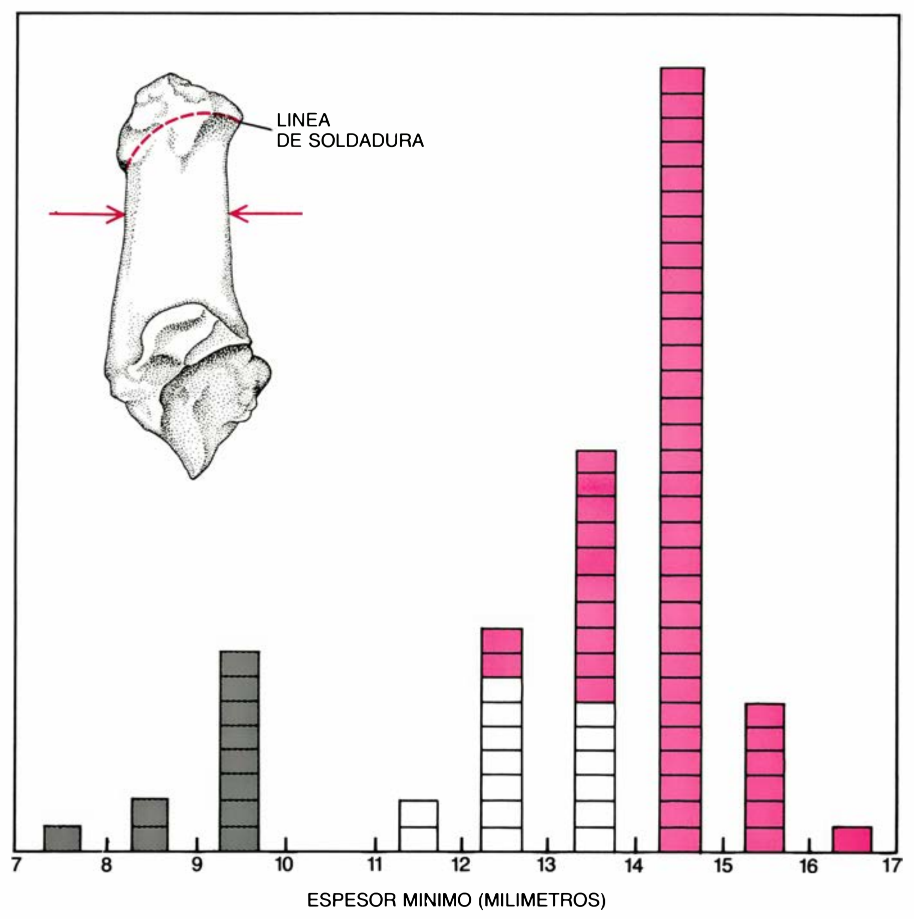
A pesar de la diferencia de forma de las paredes de acoso, las cometas vistas por Teixeira se utilizaban de manera muy parecida a la empleada en la variedad de muros de piedra; ambos tipos coexistían en la misma región. La prospección realizada por el Padre A. Poidebard, pionero de la fotografía aérea en Siria, en la década de los 30, des-



5. DENTICION DE LA GACELA y su significado para descubrir la edad de los animales sacrificados en Tell Abu Hureyra. Las tres mandíbulas pertenecen al yacimiento. Al nacer, el animal tiene tres molares "de leche" (temporales). La mandíbula de arriba, correspondiente a un recién nacido, conserva el tercer molar de leche; detrás de éste se observa el primer molar permanente. Durante el primer año salen los molares permanentes. La mandíbula del centro, de un añojo, tiene tres molares de leche y dos permanentes. A los catorce meses, aproximadamente, los molares de leche son reemplazados por premolares permanentes. El ejemplar de abajo pertenece ya a un adulto. Posee tres premolares permanentes y tres molares permanentes.



6. GRACIAS AL DESGASTE DEL TERCER MOLAR DE LECHE sabemos cuándo se cazaron las gacelas. Durante el primer año del animal, la corona del tercer molar de leche sufre un desgaste continuo. El promedio de desgaste fue calculado por medio de mediciones realizadas en cráneos de gacelas actuales (*círculos compactos*). Los terceros molares de leche de Tell Abu Hureyra (*círculos en blanco*) proceden de recién nacidos o de añojos. De ello se deduce que las gacelas debían sacrificarse en abril y mayo, cuando las crías nacían.



7. CRECIMIENTO DEL CALCANEO, o hueso del talón; confirma las matanzas estacionales. Durante el primer año de la vida de la gacela, el calcáneo (*dibujo incluido*) se ensancha considerablemente. A los 14 meses, la apófisis (protuberancia a la que se unen los tendones) se suelda por completo. Los calcáneos de Tell Abu Hureyra se distribuyen en tres tipos: delgados los de los recién nacidos (*gris*), con las apófisis sin soldar; más gruesos, pero también sin soldar (*blanco*) los huesos de los añojos; los calcáneos de los adultos son gruesos y la apófisis está soldada (*color*). Tales agrupaciones implican una cacería estacional, no continua.

cubrió cometas con muros de piedra al sur de At Taybe.

Esta concentración revestía para nosotros especial interés: tratábase del grupo de cometas del desierto más próximo a Abu Hureyra. Su presencia confirma que la matanza en masa era un sistema de subsistencia practicado en la región de Abu Hureyra, por lo menos en tiempos históricos. Aunque las manadas de gacelas se cazaban en muchos puntos de su ruta emigratoria, el más septentrional de éstos donde podían sacrificarse de forma sistemática correspondía a Tell Abu Hureyra. Llegadas allí, las manadas se fraccionaban en grupos pequeños para pasar el verano, y los métodos del sacrificio en masa perderían su valor hasta que volviesen a reunirse en julio para trasladarse al sur.

El cuadro recompuesto hasta aquí nos permite entender el sistema de subsistencia preagrícola puesto en práctica en Tell Abu Hureyra y comprender mejor el nacimiento de la agricultura en la misma. Si nos limitáramos a considerar los sacrificios en masa, podríamos suponer que Tell Abu Hureyra era un campamento estacional para caza de gacelas. Sin embargo, otros testimonios ponen de manifiesto que el lugar estaba ocupado de modo permanente desde el principio. Una de las pruebas más palpables es el enorme cerro, cuya escala hace suponer una vida sedentaria de aldea. A ello se añade que los restos vegetales de los niveles mesolíticos del tell indican que se recolectaba una amplia diversidad de posibles alimentos vegetales, cuya época de sementera abarca la mayor parte, si no la totalidad del año.

¿Se conocieron ya, en Abu Hureyra, durante el Mesolítico, algunos rudimentos de la agricultura? No es imposible. Entre los restos vegetales que Hillman tiene en estudio, hay semillas carbonizadas de trigo. Pero se trata de una forma silvestre, la espelta, y carecemos de pruebas directas de su cultivo. Es mejor la prueba proporcionada por el hallazgo de huesos de cabra y de oveja. Análisis de radiocarbono efectuados en la Universidad de Oxford han confirmado que algunos huesos de cabras y ovejas pueden datar del Mesolítico. Pero no sabemos si pertenecían a animales salvajes cazados igual que las gacelas, o a animales domésticos, criados para obtener vestido y leche, amén de su carne.

Es una cuestión compleja. Hoy no existen ovejas ni cabras salvajes en la estepa baja de las cercanías de Abu Hureyra. El carnero y la cabra salvaje rehúyen esos lugares, prefiriendo mayores altitudes y territorios más abruptos, especialmente en el caso de la cabra. Pero las zonas de alta montaña tal vez sean los únicos lugares donde estos animales pueden sobrevivir a las presiones ecológicas a que la humanidad los somete. En tiempos más remotos, las ovejas y las cabras salvajes han podido vivir cerca de Abu Hureyra. De todos modos, no es fácil distinguir los huesos de las ovejas y cabras salvajes de los de sus descendientes domésticos por sólo su tamaño y forma.

Pese a todo, si mantenemos que las ovejas y las cabras salvajes hacían acto de presencia en las tierras bajas de las proximidades de Abu Hureyra, debemos observar también que estas especies son raras en otros yacimientos de Tell, excavados por métodos recientes y donde los niveles más primitivos son tan antiguos como los de Abu Hureyra. Los yacimientos más antiguos de la región (fechados entre el 50.000 y el 10.000 a.C.), muy pequeños, carecen de la estructura de tell característica de yacimientos posteriores como el de Tell Abu Hureyra. Ovejas y cabras rara vez se encuentran en los yacimientos primitivos, que apenas han proporcionado algunos centenares de huesos de oveja. Parece probable que algo insólito estuviese sucediendo en Abu Hureyra, algo que comportaba quizá técnicas de domesticación primitivas.

Sin embargo, aunque se tratase de ovejas y cabras domésticas, su relevancia en el panorama de la economía animal fue relativamente escasa durante el Mesolítico. En total, ovejas y cabras proporcionan solamente el 10 por ciento de los huesos hallados en niveles mesolíticos; como señalamos anteriormente, las gacelas aportan el 80 por ciento. Es curioso que esa proporción se mantenga en el Neolítico inicial. Continúa en éste la cacería estacional de gacelas, y sus huesos todavía alcanzan entre el 70 y el 80 por ciento del total de los huesos del yacimiento. Y sin embargo, era esta una época en que el cultivo de las plantas estaba ya difundido por todo el Cercano Oriente, y, como Hillman ha demostrado, Abu Hureyra conocía ya el cultivo agrícola a gran escala.

Según parece, la agricultura se prac-

ticaba en sus dos vertientes: siembra y ganado. A comienzos del Neolítico, los restos de ovejas y cabras adquieren proporciones suficientes para que puedan medirse las alturas de las coronas del tercer molar de leche, como en las gacelas. Tales mediciones indican que, a diferencia de las gacelas, las ovejas y las cabras no se sacrificaban de acuerdo con un ritmo estacional, sino a lo largo del año. Práctica propia de un poblado campesino con ovejas y cabras domesticadas. Sin embargo, la importancia de estas especies sigue siendo baja, en tanto que predomina la gacela.

El dato, muy interesante, no es menos intrigante. ¿Por qué la oveja y la cabra –íntimamente asociadas a la domesticación primitiva– han de continuar desempeñando un papel de segundo orden largo tiempo después de implantada la agricultura? Una respuesta sería la presencia de manadas de gacelas fácilmente asequibles dentro de un ciclo anual. Si en el intervalo de unas semanas primaverales se puede lograr el abastecimiento de carne de un año, pocas razones aconsejarán emprender el pastoreo de rebaños.

Esta situación favorable no duró siempre. En algún momento del séptimo milenio a.C., la economía animal de Tell Abu Hureyra experimentó un cambio repentino y profundo: las gacelas cambiaron sus posiciones, en el rango de importancia, con las ovejas y las cabras. En breve tiempo, las gacelas descendieron hasta ocupar un 20 por ciento de los huesos del yacimiento. En el mismo período, ovejas y cabras aumentaron su proporción hasta dar cuenta del 80 por ciento del total de los restos óseos: la cifra que aportaban antes las gacelas.

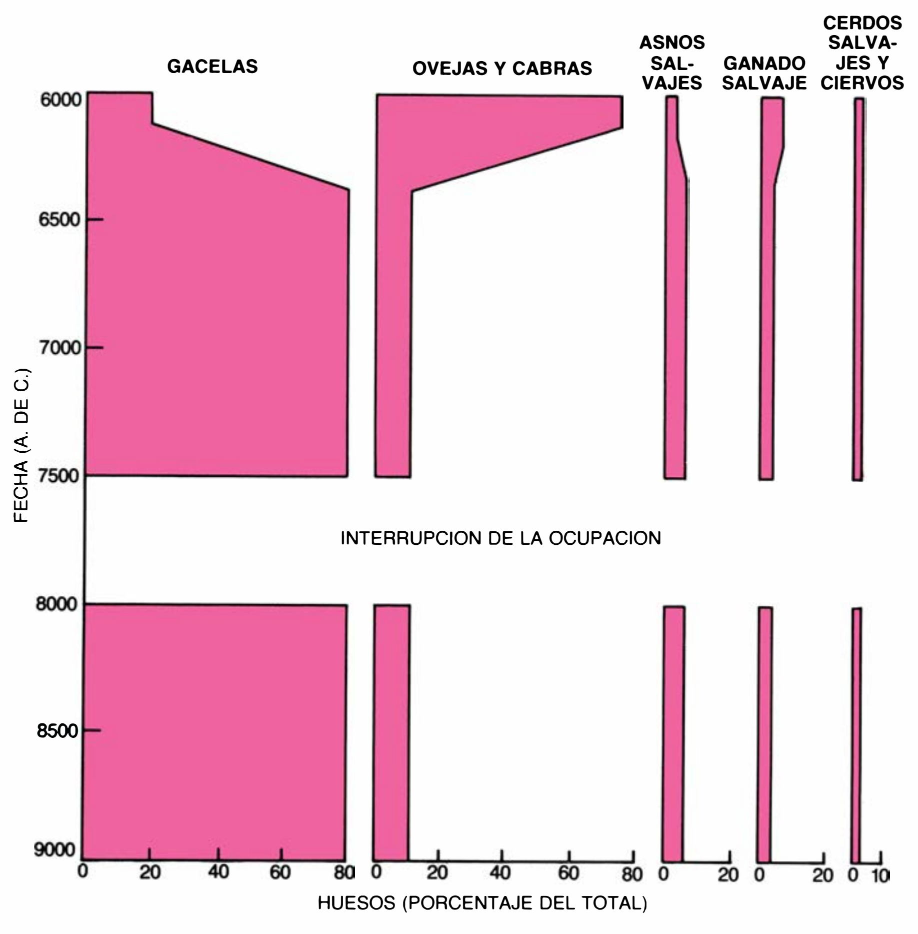
Parece que este cambio drástico tuvo que ver con acontecimientos ocurridos muy al sur del tell. Cuando empezó la captura de gacelas en Abu Hureyra, es probable que no hubiera muchas cometas en Siria y Jordania. La verdad es que pocos yacimientos mesolíticos son contemporáneos del poblamiento de Tell Abu Hureyra, en el 9000 a.C. A mediados del Neolítico, en cambio, las cometas se habían generalizado.

Las primeras fotografías aéreas, combinadas con los recientes trabajos de campo de Alison Betts y de su colega Helms, revelan una amplia concentración de cometas en el norte de Jordania. Además de por su densidad, destacan por su conexión: las paredes de acoso de una cometa se superponen a las de la siguiente, formando grandes cadenas que se extienden decenas de kilómetros por la llanura. Con semejante red, las cometas debieron diezmar las manadas de gacelas.

No es fácil datar los yacimientos de este tipo. Se levantan sobre suelo roqueño, donde los sedimentos –instrumento primordial de datación– se acumulan muy lentamente. Hay, sin embargo, indicios de que algunas de estas cometas se crearon aproximadamente en la época en que los habitantes de Abu Hureyra pasaron de las gacelas a las ovejas y las cabras. Betts ha descrito útiles de sílex de más o menos aquella fecha, hallados en cometas de Jordania oriental. Y material semejante lo hemos visto nosotros en cometas próximas de Azrak, oasis situado a 60 kilómetros al este de Ammán, en yacimientos explorados por A. N. Garrad, del Instituto Británico de Arqueología e Historia de Ammán. También se han dado a conocer útiles de piedra neolíticos procedentes de cometas del norte de Arabia Saudita. Los útiles se encuentran muchas veces sólo en esos corrales, a veces incluso en los escondites donde pudieron apostarse los cazadores.

Este despligue de pruebas indica que, en el séptimo milenio a.C., las cometas del desierto conocieron una general expansión por la estepa septentrional de Jordania. Naturalmente, el sacrificio de las manadas produce una mortandad excesiva, y esto parece haber sido lo que ocurrió. En el Mesolítico, y en la primera parte del Neolítico, las gentes de Tell Abu Hureyra constituían unos de los pocos grupos que las cazaban en masa. Algo más tarde, en el Neolítico, la expansión de las cometas por el norte de Jordania pudo haber ejercido una presión desmesurada sobre las manadas. El resultado pudo haber sido un descenso en el número de gacelas y quizás incluso un cambio en su comportamiento migratorio. La disminución de gacelas pudo, a su vez, haber forzado a la comunidad de Abu Hureyra a recurrir a la cabaña de ovejas y cabras.

Y así, con un retraso de un milenio surgió la ganadería para complementar el cultivo vegetal, y la aldea de Tell Abu Hureyra entró en la fase de la agricultura plenamente desarrollada. Uno de los aspectos más notables de este yacimiento es el detalle extremado



8. EL PORCENTAJE DE ESPECIES ANIMALES en Tell Abu Hureyra revela un cambio drástico en el séptimo milenio a.C. La anchura de las columnas indica la fracción de los huesos proporcionados por las principales especies del yacimiento. Desde el 9000 a.C., hasta poco después del 6500 a.C., el 80 por ciento de los huesos pertenece a gacelas y el 10 por ciento a ovejas y cabras. Después se produce una inversión brusca: ovejas y cabras suben a más del 60 por ciento, mientras que las gacelas bajan al 20 por ciento. El cambio pudo haber sido debido a la depauperación de las manadas de gacelas, sujetas a una caza sin tregua.

con que se puede estudiar dicho proceso. Lo que obedece, en gran medida, a dos factores: la enorme riqueza de restos orgánicos (vegetales y animales) y la continuidad que ofrece la presencia de una comunidad agrícola en el mismo yacimiento que su predecesora, la aldea de cazadores-recolectores.

No es casualidad que los dos tipos de aldea se asentasen en aquel lugar. El emplazamiento se veía claramente favorecido por circunstancias que fomentaron la ocupación permanente desde muy pronto. Las plantas del valle fluvial se combinaban con los animales de la estepa para proporcionar abastecimiento suficiente durante todo el año. A largo plazo, la estabilidad de esta economía cazadora-recolectora se conmocionó en dos ocasiones por cambios repentinos: primero, la introducción del cultivo de las plantas; luego, unos 1000 años después, la ganadería, que sustituyó a la caza esteparia.

Varias lecciones pueden sacarse de esta exposición. La primera es que el comienzo del sistema de vida agrícola no tiene por qué ser un proceso unitario. Una idea muy debatida en la arqueología de las últimas décadas es la concerniente a la "Revolución Neolítica", que comporta el establecimiento de poblados permanentes y el origen de la agricultura. La idea de revolución sugiere un cambio brusco y repentino. La prehistoria de Tell Abu Hureyra no evidencia, sin embargo, ninguna transformación exclusiva, arrolladora, sino un proceso paulatino en que ciertos elementos clave (el modo de vida sedentario, el cultivo y la ganadería) van llegando paso a paso durante un prolongado período.

Puede haber también otro aspecto en que el cuadro de la revolución sea deficiente. Entre sus supuestos básicos, la agricultura cuenta con el de su superioridad en capacidad productiva a los sistemas de caza-recolección. A largo plazo, eso es cierto. Pero en un lugar determinado y durante el período en que nace la agricultura, los viejos métodos pueden resultar mejores. En Abu Hureyra, la facilidad de las matanzas en masa retrasó la introducción del pastoreo hasta que las ventajas de la caza se vieron mermadas por acontecimientos ocurridos a mucha distancia. La domesticación no se limita a suceder y reemplazar inmediatamente a los viejos sistemas. Antes bien, suele marchar a su par hasta que se la requiere para responder a nuevas demandas. Una gran aportación de Tell Abu Hureyra es la de haber ayudado a los arqueólogos a comprender este proceso complejo y fundamental.

Contaminación atmosférica por partículas

Las partículas ácidas de la atmósfera reducen la visibilidad y dañan los materiales. Métodos ingeniosos han puesto de manifiesto que la principal fuente de partículas es la combustión de carburantes fósiles

Robert N. Shaw

En muchas partes del mundo, las fachadas de los tesoros arquitectónicos se están deteriorando. Las tierras y lagos se vuelven anormalmente ácidos, limitando, si no extinguiendo, la vida vegetal y animal. Gran parte de esos daños se atribuye hoy a la lluvia ácida, es decir, a la lluvia o a la nieve portadoras de ácidos en disolución.

Pero la precipitación húmeda no es la única vía que siguen los contaminantes para llegar al suelo desde la atmósfera; la difusión y otros procesos permiten a los gases y partículas ácidas alcanzarlo, incluso en ausencia de precipitación. Muchos científicos del medio ambiente sospechan que la deposición seca es tan destructiva para los materiales y el entorno como lo son la lluvia o la nieve contaminadas, y sugieren que una definición mejorada de "lluvia ácida" debería incluir ambas: la deposición húmeda y la seca.

Los depósitos secos han merecido una atención mucho menor que la lluvia ácida en cuanto tal, por la sencilla razón de que, durante bastante tiempo, se conocieron peor. En los últimos 10 años, sin embargo, los investigadores han descubierto nueva y sorprendente información acerca de las fuentes y posibles efectos de las partículas atmosféricas. De hecho, los estudios de seguimiento de las muestras de partículas hasta sus fuentes han ayudado a desterrar la idea de que las emisiones naturales de pantanos, volcanes y árboles serían las responsables de gran parte de la precipitación ácida en todo el globo. Queda ya fuera de duda que, incluso en zonas rurales, la deposición ácida (húmeda y seca) proviene casi siempre de la actividad humana: sobre todo de la combustión de carburantes para la producción de energía, la industria y el transporte.

Cuando se quema carbón y ciertos otros combustibles, se emiten muchas substancias; entre ellas, partículas de carbono (si la combustión es deficiente) y gas dióxido de azufre (SO_2). Además, las altas temperaturas de la combustión instan la combinación del nitrógeno del aire con el oxígeno, dando lugar a óxidos de nitrógeno (NO_x) gaseosos. Cuando los gases encuentran agua o moléculas con ella relacionadas en la atmósfera, forman gotitas de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3) gaseoso, ambos fácilmente solubles en la lluvia que cae. Si la atmósfera está relativamente seca, el ácido nítrico tiende a permanecer en estado gaseoso, en tanto que el ácido sulfúrico tiende a formar diminutas partículas. Llegan éstas al suelo, algunas veces en forma de lluvia. Ahora bien, unas y otras sedimentan, con frecuencia, directamente.

Los primeros estudios sobre las partículas atmosféricas arrojaron escasa luz sobre la naturaleza y causas de la deposición ácida, porque resultaba difícil medir y analizar tales partículas. La lluvia recogida en un colector suele reflejar la cantidad y composición de la precipitación en la zona. Pero, ¿qué ocurre con las partículas en suspensión en el aire? A menos que se recojan mediante equipos especiales, las muestras resultantes no proporcionarían la misma información fidedigna. Además, las partículas constan frecuentemente de una mezcla de substancias, con lo que la identificación de sus componentes, y por tanto de sus fuentes, se convierte en un desafío.

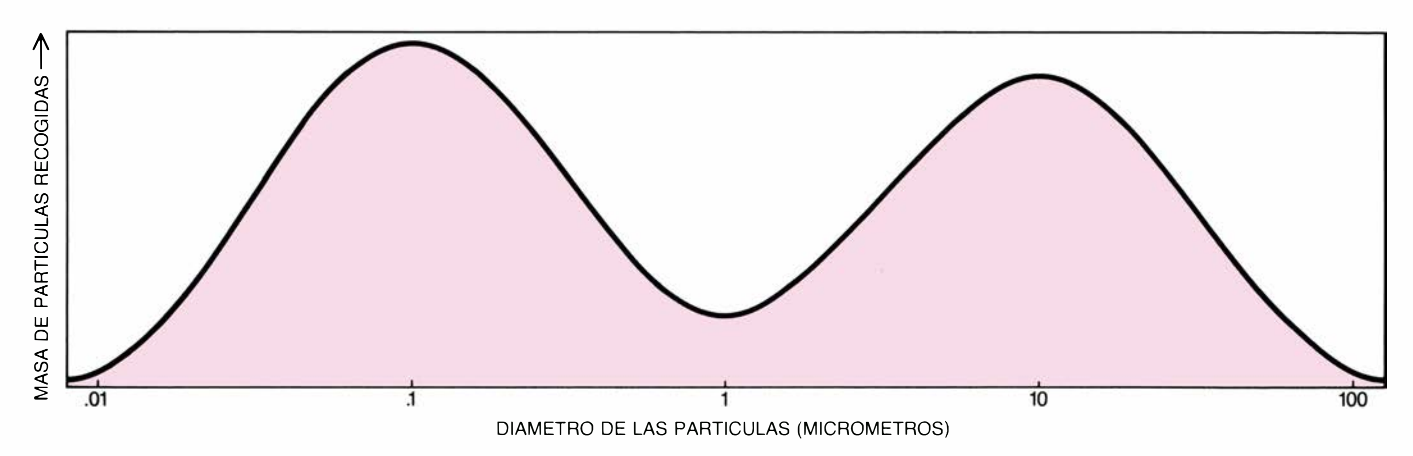
Pese a todos esos obstáculos, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency, EPA) decidió, a finales de los años setenta, que las partículas atmosféricas presentaban interés suficiente para justificar un renovado esfuerzo de recogida y análisis. Amén de ensuciar los edificios y dañar los materiales, creíase que contribuían a la bruma que reduce la visibilidad estival en extensas regiones del Este de los Estados Unidos. Con la ayuda de especialistas en el proyecto de instrumentos, química analítica y estadística, un grupo de los que trabajábamos en la EPA nos propusimos desarrollar equipos y técnicas compatibles que nos permitieran recoger eficazmente partículas del aire, determinar su composición y sacar deducciones fundadas sobre las materias que las originan.

Para recoger muestras múltiples de manera reproducible, necesitábamos un colector automático. La máquina habría de captar muestras de manera que reflejasen la concentración total de partículas atmosféricas en la zona. También tendría que dividir su "cosecha" en dos grupos: partículas pequeñas (de diámetro inferior al micrometro) y partículas mayores, pues los estudios pioneros habían demostrado que los dos grupos de tamaños diferían cualitativamente. (Un micrometro es la milésima parte de un milímetro.)

El descubrimiento de que las partículas de distinto tamaño podían tener naturaleza diferente surgió a raíz del tratamiento estadístico de los datos.

1. EL AIRE DE LAS MONTAÑAS de la Georgia soviética era considerablemente más claro el 9 de julio de 1979 (*arriba*) que el 21 de julio del mismo año (*abajo*). El aumento de la calima y la reducción de visibilidad hacia fines de mes debiéronse, en parte, a una mayor concentración de partículas atmosféricas que contenían sulfato (SO_4^{2-}). El tamaño de estas partículas, frecuentemente ácidas, las convierte en eficaces difusores de luz. La presencia de sulfato, que apenas se forma en procesos naturales, constituyó una sorpresa. Significaba que el aire estaba más contaminado de lo que se había supuesto por industrias alejadas de aquella zona.


9
21



2. CURVA CON DOS MAXIMOS, característica de las partículas atmosféricas de todo el mundo. Se obtiene cuando se representa el diámetro de las partículas recogidas en el eje de abscisas (en escala logarítmica) y se construye una curva sobre dicho eje, de suerte tal que el área subyacente a la misma sea proporcional a la masa de las partículas recogidas en cualquier intervalo de tamaños. Los dos máximos de la gráfica reflejan un fenómeno: las partículas de diámetro inferior a un micrometro difieren de las mayores cualitativamente, es decir, en su composición química. Las partículas pequeñas suelen ser productos ácidos de combustión y se forman por acreción. Las partículas grandes, que no son ácidas por lo común, se deben a la erosión mecánica de substancias naturales.

Cuando los investigadores intentaron estudiar la deposición seca, contaron frecuentemente las partículas en varios intervalos de tamaños. Y observaron que el número aumentaba con la disminución del diámetro. La tendencia, aunque interesante, revelaba muy poco acerca de la naturaleza de las muestras.

Así las cosas, los expertos que estudiaban la bruma de Los Angeles decidieron, hace unos 20 años, investigar la masa total de las partículas en diferentes intervalos de tamaño. En cada uno de los cientos de muestras, hallaron una división aparentemente natural: las partículas con diámetros en el dominio de 0,1 hasta el micrometro (partículas pequeñas) constituían una elevada fracción de la masa, mientras que las que tenían diámetros comprendidos entre uno y 100 micrometros (partículas grandes) formaban el resto [*véase la figura 2*]. Esta invariable división sugería que las partículas pequeñas y grandes no sólo diferían en tamaño, sino que constituían también materias distintas.

Desde entonces, muchos trabajos han confirmado esa realidad. Han mostrado que las partículas pequeñas de la atmósfera provienen, sobre todo, de procesos químicos, en especial reacciones de combustión, y son esencialmente ácidas. Exigen, pues, un escrutinio exhaustivo en muchos análisis. En cambio, las partículas grandes provienen principalmente de la erosión mecánica de materias naturales, suelos por ejemplo, y están dominadas por sustancias no ácidas. Aunque queda mucho por conocer sobre los procesos que rigen el crecimiento de una partícula en la atmósfera, sí parecen tener límite propio: el crecimiento cesa cuando el diámetro se acerca al micrometro. Los procesos mecánicos, por otro lado, no suelen desmenuzar los materiales en fragmentos inferiores al micrometro de diámetro.

El reto que implicaba recoger una muestra representativa y, al mismo tiempo, dividirla en dos grupos se ganó inventando el aspirador de impacto virtual, máquina que se basa en la diferente capacidad de las partículas pequeñas y grandes para cambiar su dirección de movimiento. Una corriente de aire arrastra las partículas del exterior hacia el interior del artilugio. Ahí, la corriente se divide en dos: un ramal continúa en línea recta, mientras que el otro "dobla una esquina", moviéndose 90 grados hacia un lado antes de volver a fluir en la dirección original.

Las partículas mayores inmersas en la corriente resultan demasiado pesadas para describir el camino en ángulo, y siguen con la porción de la corriente en línea recta, hasta una cámara llamada superficie virtual. En la cámara, su movimiento se frena y se depositan suavemente sobre un filtro de teflón, distribuyéndose uniformemente en su superficie. (En los instrumentos primitivos, las partículas que se movían a gran velocidad rebotaban frecuentemente en los filtros, falseando las medidas finales.)

Las partículas más finas, por el contrario, pueden realizar bruscos cambios de dirección. Siguen la corriente curva y se recogen uniformemente en un filtro de otra parte del aspirador. Automatizados y cargados con pilas de filtros, los aspiradores de impacto virtual pueden operar por sí solos durante un mes o más, acumulando muestras de acuerdo con un calendario escogido por el investigador. Empleamos teflón para los filtros porque la fibra de vidrio, material usado en un comienzo, reacciona con los gases, creando nuevas partículas y falseando los resultados. El teflón no reacciona con los gases atmosféricos.

Después de recoger una muestra, hay que determinar su masa y así calcular la concentración de las distintas substancias de la atmósfera. Podríamos medir directamente la masa pesando el filtro antes y después de recoger la muestra, pero este proceso resulta demasiado engorroso si se ha de repetir una y otra vez. De ahí que decidiéramos recurrir al medidor beta, un instrumento propio de la física nuclear. Filtro y muestra se colocan entre un emisor y un detector de partículas beta, que son electrones despedidos por ciertas materias radiactivas. El medidor determina la masa contando el número de electrones que atraviesan el filtro. Cuanto mayor sea la masa de la muestra, tanto menor será el número de partículas que lleguen al detector.

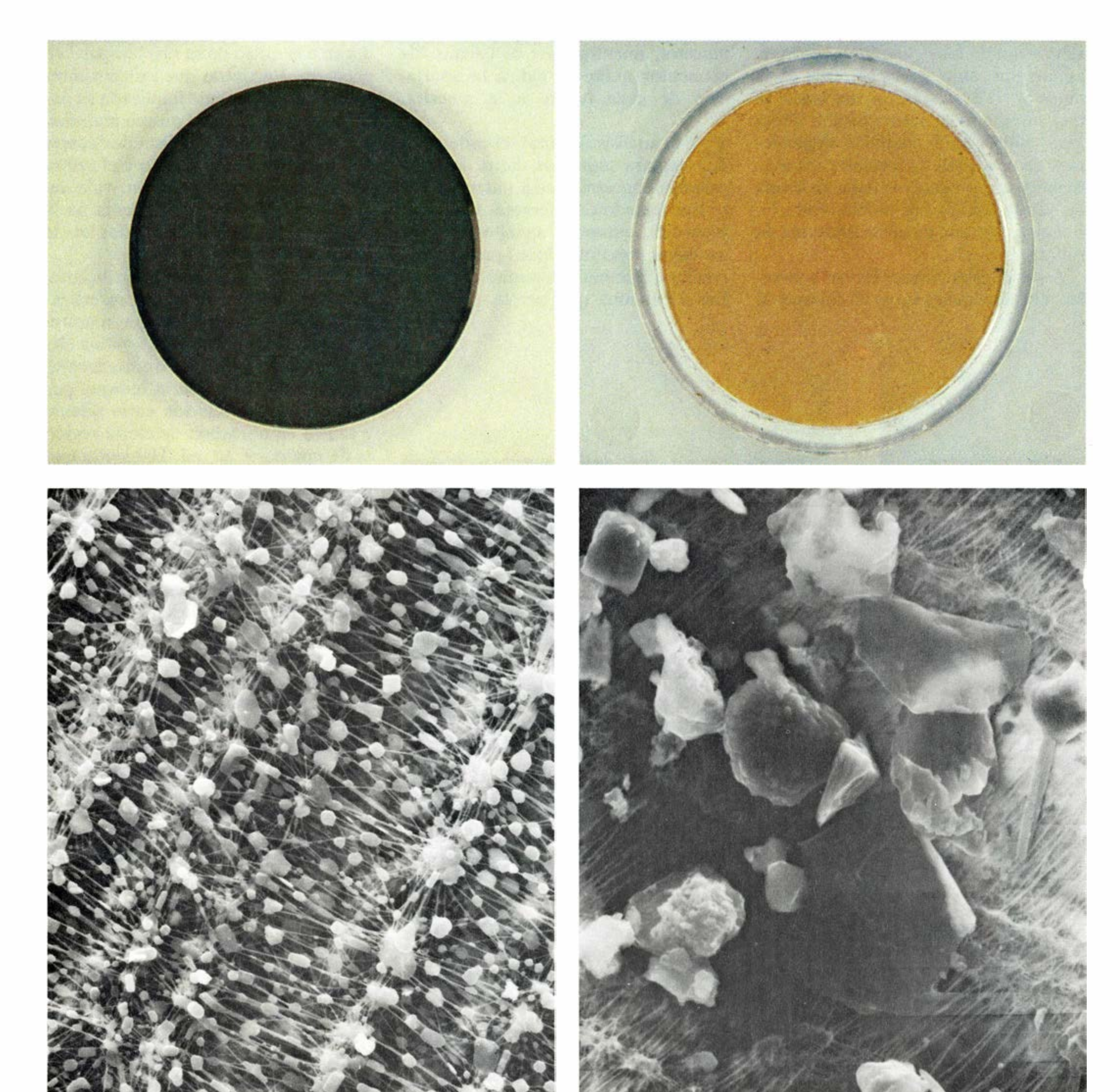
El segundo método de aplicación rutinaria, la espectroscopía por fluorescencia de rayos X, procede también de la física nuclear. En tal espectroscopía, se hace pasar a través del filtro rayos X (y no partículas beta), identificando así sus elementos atómicos. La radiación estimula la muestra haciéndole emitir rayos X de diversos niveles de energía. Cada nivel es característico de un elemento de la muestra, mientras que la intensidad de la radiación (el número de rayos emitidos) mide la concentración del elemento. El método, uno de los varios que podíamos haber escogido, es de alta sensibilidad y puede medir muchos elementos simultáneamente. Lo mismo que el medidor beta, deja la muestra esencialmente intacta para futuros análisis.

La espectroscopía por fluorescencia de rayos X, rápida y fácil en su manejo, constituye el método habitual, si bien suministra sólo una grosera guía acerca

de la composición de la muestra recogida. Aunque indica los elementos presentes, no puede especificar, por ejemplo, si la especie molecular del azufre es sulfato (SO_4^{2-}), ni indicar si ciertos elementos están combinados en la misma partícula. Información de obvia importancia, porque el estado químico de un elemento afecta tanto a su comportamiento como a su impacto sobre el medio ambiente; ayuda también a sugerir la posible fuente del elemento.

Para saber más hay que acometer otros análisis, algunos de los cuales destruyen la muestra, aunque no todos. Las pruebas que un grupo de investigadores escoge dependen del objetivo del estudio y del presupuesto disponible. Nosotros realizamos valiosos análisis inofensivos con microscopía óptica y electrónica, que, no obstante su lentitud, pueden revelar las especies de partículas que tienen morfologías conocidas.

En años recientes, los investigadores han analizado también las muestras mediante difracción de rayos X. La dispersión de los rayos X por una substancia cristalina revela su estructura tridimensional; ésta, a su vez, puede indicar la fuente de la materia. En ese contexto, la técnica ha descubierto la presencia de ciertas muestras de mullita, variedad de silicato de aluminio que se forma sólo a altas temperaturas, como las que se dan durante la com-



3. PARTICULAS PEQUEÑAS Y GRANDES **recogidas del aire. Presentan, con frecuencia, una morfología muy distinta. En muestras recogidas en unas obras de construcción de Carolina del Norte (*arriba*), la fracción de partículas pequeñas (*izquierda*), en buena parte, producto del gasóleo consumido por las máquinas excavadoras, es negra. La fracción de partículas grandes (*derecha*), que consta principalmente de arcilla triturada por las ruedas de los vehículos, es anaranjada. De manera análoga, cuando se examinan al microscopio electrónico las muestras recogidas en aire urbano (*abajo*), las partículas pequeñas (*izquierda*) aparecen lisas y uniformes; e irregulares, las grandes (*derecha*). Con aumentos mayores, la forma de una partícula puede indicar su origen. David L. Johnson, del Colegio de Ciencias del Ambiente y Forestales de la Universidad del estado de Nueva York en Syracuse, es autor de las microfotografías.**

bustión del carbón. Tiene esta substancia una estructura cristalina definida que la distingue de otras formas de silicatos de aluminio presentes en tierras y arcillas.

Se trata de métodos no destructivos valiosos, pero los investigadores se ven obligados, por lo común, a analizar químicamente una muestra para determinar el estado de sus elementos constituyentes. Pensemos, a modo de ejemplo, en la disolución de una muestra en agua; el proceso provoca la disociación de los iones, que permite medir la concentración de iones hidrógeno y determinar, por tanto, la acidez total de la muestra. (Por definición, un ácido es una substancia que en solución libera iones hidrógeno.) También dependemos de esta clase de análisis para averiguar si el nitrógeno se halla en forma de nitrato (NO_3^-) o de amonio (NH_4^+), o si el azufre está presente en forma de sulfato.

Aunque estas manipulaciones directas revelan algunas veces las fuentes de ciertas partículas, lo habitual es que se deba recurrir a complicados análisis estadísticos, y a cierta dosis de especulación subjetiva, para identificar tales fuentes. Entre los métodos particularmente informativos destacan el análisis factorial, desarrollado por los psicólogos en los primeros decenios de nuestro siglo, y el "balance de elementos químicos", que se elaboró para el estudio de partículas atmosféricas a principios de los años setenta. El análisis factorial ayuda a identificar las fuentes materiales probables del elemento de una muestra, mientras que el balance de elementos químicos indica la aportación de cada fuente a la muestra.

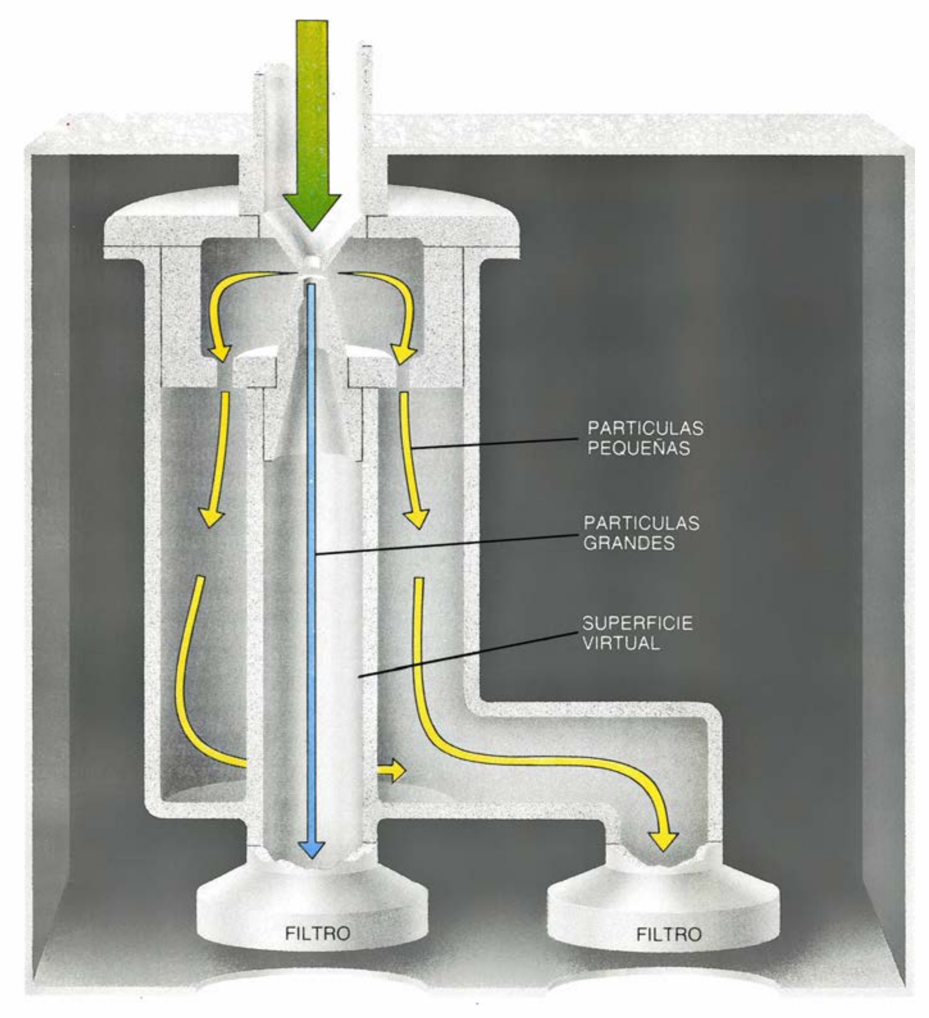
En el análisis factorial, el ordenador explora todos los datos de composición concernientes a muestras que se han tomado en diferentes instantes. Identifica, entonces, aquellos elementos cuyas concentraciones parecen aumentar o disminuir en mutua sincronía. Los elementos que varían conjuntamente pueden tener el mismo origen (y quizá se den juntos en las partículas). Para sugerir las fuentes de los elementos relacionados, el ordenador compara luego los elementos, que están agrupados estadísticamente, con una lista de posibles fuentes y sus "huellas", es decir, las combinaciones de elementos que emiten habitualmente.

Imagínese que se miden durante cuatro días consecutivos las concentraciones de selenio y azufre, y que ambos elementos se duplican en el segundo día, se triplican en el tercero y se reducen a la mitad de su nivel original en el cuarto. Encontrar que los elementos varían conjuntamente implicaría su posible proveniencia del mismo material. La exploración de una lista de fuentes nos revelaría que el selenio y el azufre son componentes del carbón; vale decir: el carbón puede dar cuenta de la presencia de ambos elementos en la muestra.

Para realizar un análisis de balance de elementos químicos, los investigadores compilan una lista que muestra las relaciones habituales de varios elementos producidas por diversas fuentes posibles. Tal lista podría indicar, por ejemplo, que la relación entre selenio y azufre en el carbón de cierta región es de una parte en mil. Habiendo medido las concentraciones de los elementos elegidos en una muestra específica, los análisis podrían entonces predecir, fundándose en las relaciones habituales de la lista de fuentes, cuáles serían las concentraciones de los otros elementos en la muestra, si proceden de la misma fuente.

Si se observa que una muestra de partículas incluye 0,01 microgramos de selenio y la lista señala que el selenio es un elemento traza en el carbón, los investigadores podrían suponer que todo el selenio proviene del carbón y que la cantidad de azufre procedente del carbón en la muestra deberá ser de 10 microgramos. Si se corrobora la cantidad de azufre predicha, podría concluirse que todo el selenio y todo el azufre provienen, probablemente, del carbón.

Ni que decir tiene que, los elementos pueden producirse en distintas fuentes. El método de balance de elementos químicos aborda esa dificultad postulando (a partir de las relaciones conocidas) varias concentraciones elementales diferentes que podrían generarse en las fuentes sospechosas. Se determina, entonces, la combinación que mejor se ajusta a las concentraciones reales de las muestras recogidas. Tales técnicas podrían revelar, por ejemplo, que el 80 por ciento de la fracción fina



4. EQUIPO DE RECOGIDA conocido como aspirador de impacto virtual, que arrastra las partículas atmosféricas mediante una corriente de aire y luego las separa en dos grupos de acuerdo con el tamaño de las mismas. Las partículas mayores, que son bastante pesadas, no pueden alterar su trayectoria cuando parte de la corriente se desvía hacia un lado; por el contrario, fluyen directamente hacia el interior de una cámara ("superficie virtual"), donde su movimiento se retarda para que no reboten al llegar al filtro colector. La mayoría de las partículas pequeñas siguen la corriente desviada y acaban depositándose en otro filtro.

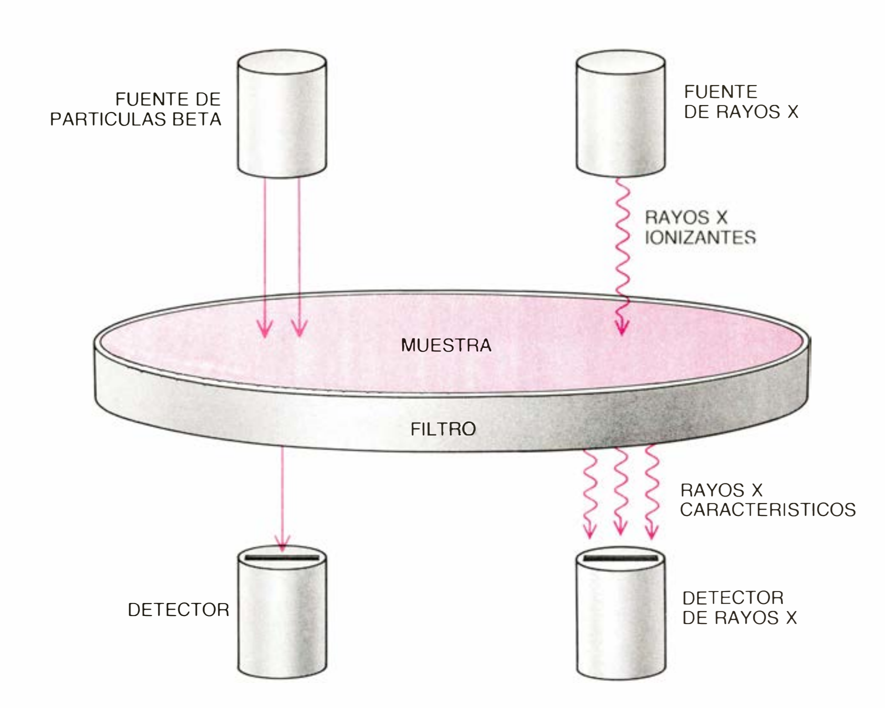
de una muestra es un producto secundario de la combustión del carbón, y que el 15 por ciento proviene de los vehículos de motor. O podrían manifestar que el 94 por ciento del plomo de una muestra procede de los vehículos de motor, otro 4 por ciento de la combustión de desechos y el 1 por ciento restante de la combustión de carbón.

Contando con este nuevo conjunto de herramientas y técnicas, nuestro grupo de la Agencia de Protección Ambiental estableció, hace varios años, un laboratorio provisional en el Parque Nacional de las Grandes Montañas Ahumadas, en Tennessee. Nuestra misión, integrada en un programa mucho más amplio, destinado a estudiar la calidad del aire del lugar, consistía en determinar las contribuciones relativas de las emisiones naturales (de la vegetación) y de las emisiones procedentes de los vehículos a motor y la industria.

En aquella época, mucha gente creía que la bruma de la zona originábase de las pequeñas partículas producidas cuando los hidrocarburos gaseosos emitidos por los árboles de hoja perenne reaccionaban con otras substancias del ambiente. La fluorescencia de rayos X y los estudios químicos mostraron, sin embargo, que los hidrocarburos contribuían poco a la masa de nuestras muestras, mientras que dominaban los sulfatos ácidos. De hecho, los niveles de sulfatos eran mucho más altos que los que se acostumbra a encontrar en ambientes rurales: ello nos indujo a concluir que la combustión de carburantes había afectado la atmósfera del parque.

El descubrimiento realizado en las Montañas Ahumadas causó una gran sorpresa, igual que lo hizo un estudio similar acometido bajo los auspicios de un programa conjunto de investigación del medio ambiente entre los Estados Unidos y la Unión Soviética. En este segundo caso, nos proponíamos desentrañar la formación de partículas por los productos químicos que emitían los árboles de hoja perenne. Para obviar la interferencia de la contaminación, viajamos hasta un remoto observatorio astronómico, sito en las montañas de la Georgia soviética, región conocida por la limpieza de su aire, así como por sus impresionantes extensiones de bosque de árboles de hoja perenne.

Durante un mes, nuestro grupo y el de científicos ambientales de la Unión Soviética midió gases y partículas. Los estudios de gases mostraron que había sólo niveles bajos de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y halocarburos (clase de gases entre los que están los



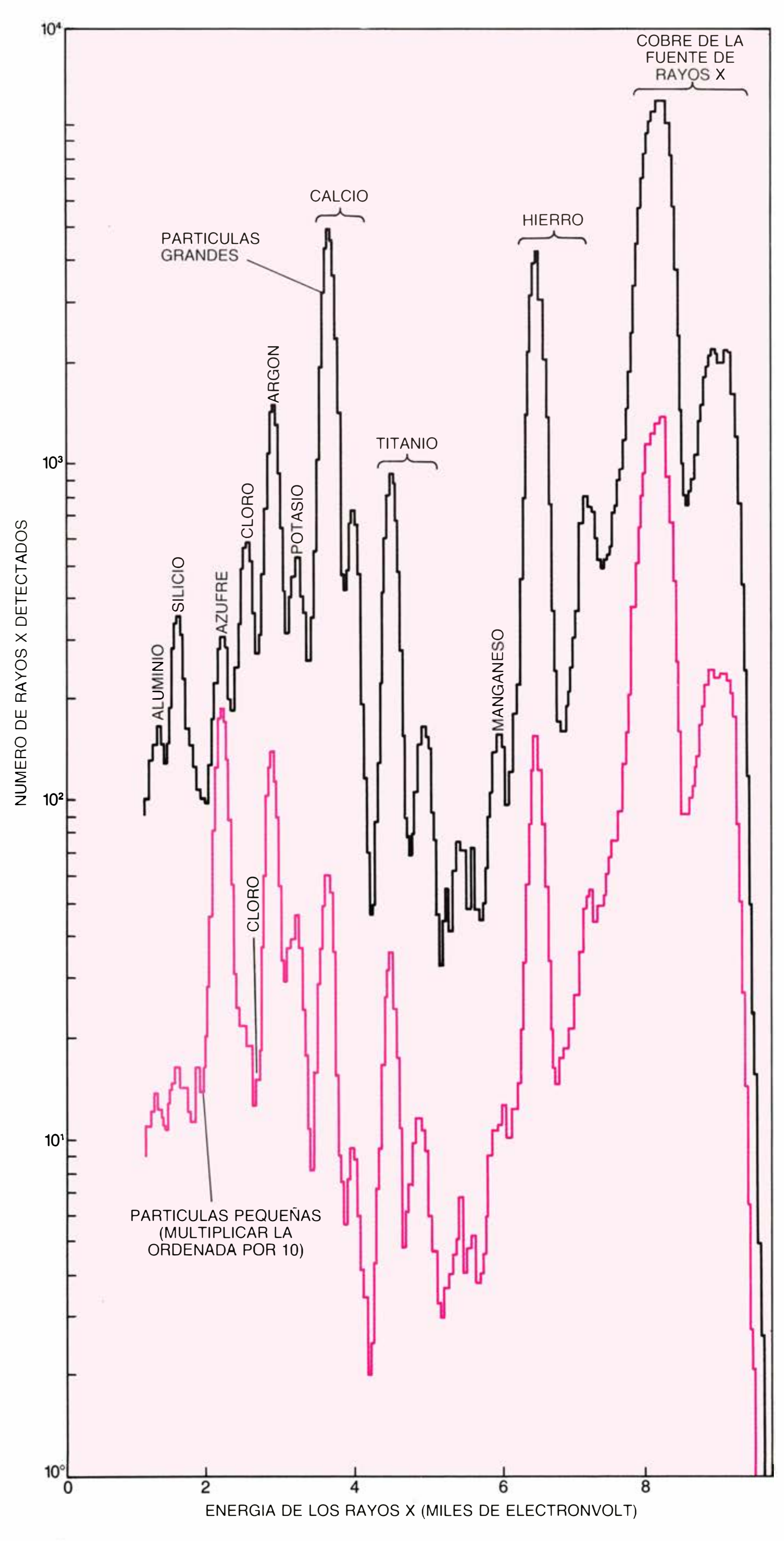
5. DOS TECNICAS nos permiten analizar las partículas sin sacarlas de los filtros colectores. Para determinar la masa de una muestra (*izquierda*), se introduce el filtro donde se han depositado las partículas entre una fuente que emite rayos beta y un detector que los cuenta. Al aumentar la masa, disminuye el número de partículas beta que puede penetrar la muestra. Para determinar los elementos atómicos de una muestra, puede recurrirse también a la espectroscopía de fluorescencia de rayos X (*derecha*). Los rayos X que atraviesan una muestra provocan que cada elemento emita rayos X característicos. Los niveles de energía de los rayos revelan la identidad de los elementos; la intensidad de los rayos manifiesta las concentraciones.

empleados en los refrigerantes, que reducen el ozono). Tales resultados son indicativos, por lo común, de un aire limpio. Sin embargo, la mezcla de partículas atmosféricas recordaba, muy de cerca, a la que se halló en las Ahumadas: sulfatos principalmente, con sólo una pequeña fracción de hidrocarburos. La verdad es que no pudimos obtener suficientes hidrocarburos para realizar el estudio que habíamos proyectado en un principio.

El hallazgo de cantidades importantes de partículas que contenían sulfatos, en lo que se suponía dos regiones de aire puro, planteó una cuestión obvia: ¿Cuál era su fuente principal? Concedimos nuestro voto al carbón quemado en regiones distantes, pues los productos secundarios de la combustión del mismo se lanzan a la atmósfera a través de altas chimeneas. Este método reduce la contaminación en la proximidad inmediata, pero permite que el gas dióxido de azufre permanezca en la atmósfera durante un tiempo suficiente para viajar y para combinarse con otras substancias, formando partículas. En confirmación de esta teoría, hemos visto que las partículas de sulfatos de la Georgia soviética, región alejadísima de las industrias, son más antiguas que las halladas en las Ahumadas. En la franja oriental de los Estados Unidos, una quinta parte del azufre atmosférico toma forma de partículas; en la Georgia soviética, hay treinta veces más azufre constituido en partículas que transformado en gas dióxido de azufre.

Aunque sospechábamos que el carbón era la fuente principal de sulfatos detectados en las Montañas Ahumadas y en nuestro campamento soviético, no hallamos un eslabón concluyente entre las centrales térmicas y las partículas atmosféricas hasta que realizamos un estudio, de 16 meses de duración, en el valle del río Ohio. Esta región aloja la mayor concentración de centrales térmicas de carbón de los Estados Unidos.

Para ese trabajo, quisimos acudir a un análisis más adecuado del caso. Y así fue como instalamos nuestras estaciones de muestreo en zonas rurales de Kentucky, Indiana y Ohio, lejos de las ciudades, las carreteras y los penachos de humo de las centrales térmicas. ¿Qué observamos? En promedio, alrededor del 50 por ciento de la masa de las partículas pequeñas constaba de sulfatos; la concentración total era casi igual a la de las ciudades industriales de la región. En esta ocasión, sí pudimos relacionar de manera definitiva los sulfatos con la combustión de carbón, pues hallamos una invariable asociación entre la concentración de sulfatos y la del elemento traza selenio. No existen otras fuentes probables de selenio en el valle del río Ohio, ni en su vecindad.



6. ESPECTROGRAFIA DE RAYOS X de partículas recogidas por Thomas G. Dzubay, de la Agencia de Protección Ambiental. Muestra que el azufre es el elemento más abundante en la fracción de partículas pequeñas. Este azufre procede habitualmente del carbón. (El número de rayos X producido por cada elemento de la fracción de partículas pequeñas se determina multiplicando el valor en el eje vertical por 10.) El silicio, el calcio y el hierro, componentes habituales del polvo de tierra, son los integrantes principales de la fracción de partículas grandes. Los máximos de argón corresponden al aire del espectrómetro.

Se sabe ya que los sulfatos aportan la fracción mayor de la masa de las pequeñas partículas en buena parte del sector oriental de los Estados Unidos y en otras muchas regiones. Ahora bien, las partículas que contienen sulfatos son, con frecuencia, altamente ácidas; por tanto, resulta explicable que dañen los materiales y alteren el equilibrio ácido-base de los ecosistemas, de manera similar a como lo hace la lluvia ácida.

Hay indicios también de que estas partículas, por su tamaño y consiguientes propiedades de difusión de la luz, afecten al balance de temperatura entre la atmósfera y la superficie de la Tierra, causando perturbaciones en el tiempo. Da la coincidencia de que las partículas pequeñas de la atmósfera son, justamente, del tamaño adecuado para difundir con suma eficacia la luz. Los cálculos basados en modelos señalan que esta difusión puede enfriar la superficie terrestre (impidiendo que la radiación solar llegue a ella) y calentar la alta atmósfera. Estas alteraciones podrían, a su vez, modificar los movimientos naturales de las masas de aire y favorecer la formación de inversiones de temperatura, es decir, de condiciones en que la temperatura aumenta con la altura, en vez de disminuir. Las inversiones provocan que el aire (y los contaminantes que contiene) queden estancados.

No se ha demostrado todavía la realidad de esos efectos, pero sí se ha comprobado otro, muy tangible: al difundir la luz, las altas concentraciones de partículas ricas en sulfatos reducen la visibilidad de la atmósfera. La prueba de que los sulfatos contribuyen a la mala visibilidad proviene de muchas fuentes. Un análisis de los niveles de visibilidad y del consumo de carbón en los Estados Unidos ha mostrado que la visibilidad ha disminuido apreciablemente a medida que ha ido creciendo el consumo de carbón. (La visibilidad ha disminuido en muchas regiones del mundo, incluso en el Artico.)

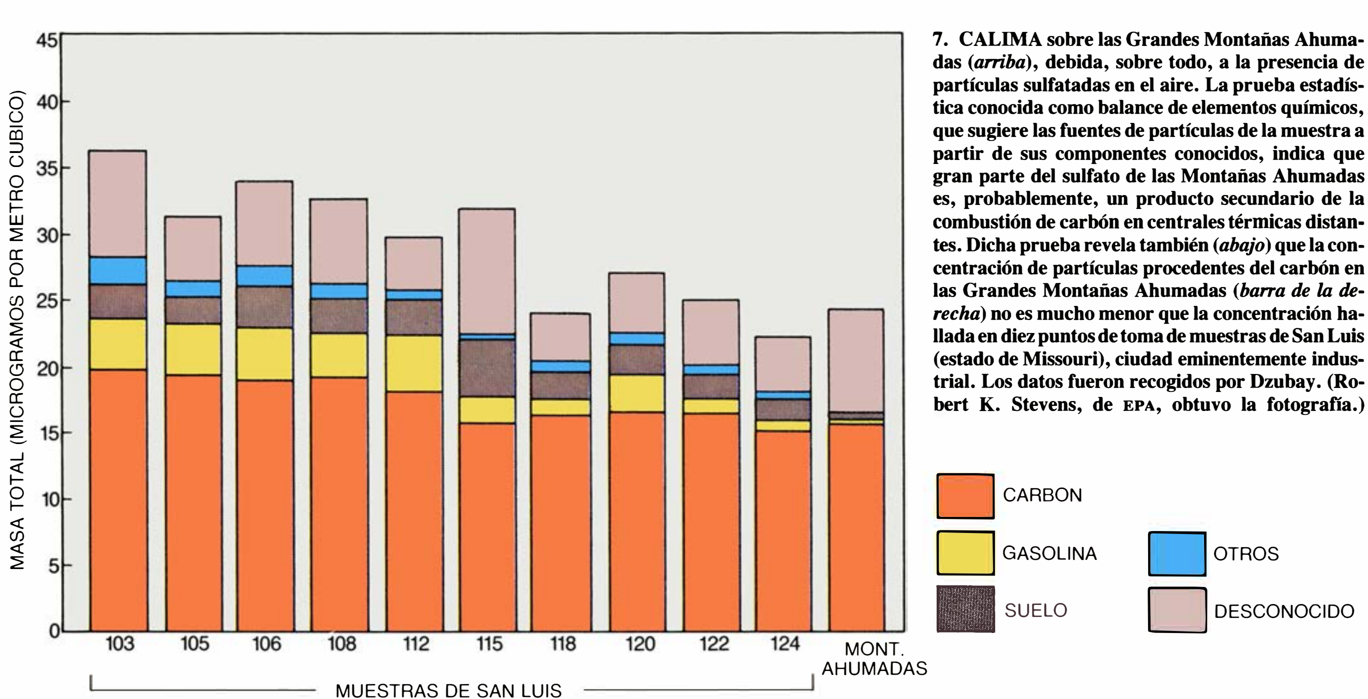
En la Georgia soviética, observamos que la visibilidad disminuía apreciablemente a medida que la concentración de partículas sulfatadas aumentaba. En el valle del río Ohio, la fracción de azufre que aparece en forma de partículas se eleva de manera espectacular de invierno a verano, paralelamente con el aumento de la frecuencia de brumas. Las concentraciones de sulfatos crecen probablemente en verano porque hay períodos más largos de luz solar y de altas temperaturas y humedades. Tales

condiciones incrementan la velocidad a la que el gas de dióxido azufre se convierte en partículas sulfatadas. Al mismo tiempo, la mayor frecuencia en verano de períodos de estancamiento del aire permite la acumulación de los contaminantes atmosféricos.

Los sulfatos son los componentes dominantes de las partículas pequeñas en gran parte de los Estados Unidos. Conviene señalar, sin embargo, que según un reciente estudio de la zona de Los Angeles, de un año de duración, el carbono podría constituir también un componente importante de la fracción de partículas pequeñas; de hecho, da cuenta de la mayor parte de la masa de partículas pequeñas registrada en esa zona. Este carbono fraccionado en partículas parece ser un producto secundario directo de los carburantes quemados por los vehículos a motor y por la industria; no proviene de los gases hidrocarburados desprendidos por los árboles y otras fuentes. Las centrales térmicas modernas, que queman eficazmente el combustible, no emiten

LUGAR: MONTAÑAS AHUMADAS

FECHA: 24/9/78
HORA: 11:30
SULFATOS: 26 $\mu g/m^3$
CARBONO VOLATIL: 2,5 $\mu g/m^3$
CARBONO ELEMENTAL: 1 $\mu g/m^3$



7. CALIMA sobre las Grandes Montañas Ahumadas (*arriba*), debida, sobre todo, a la presencia de partículas sulfatadas en el aire. La prueba estadística conocida como balance de elementos químicos, que sugiere las fuentes de partículas de la muestra a partir de sus componentes conocidos, indica que gran parte del sulfato de las Montañas Ahumadas es, probablemente, un producto secundario de la combustión de carbón en centrales térmicas distantes. Dicha prueba revela también (*abajo*) que la concentración de partículas procedentes del carbón en las Grandes Montañas Ahumadas (*barra de la derecha*) no es mucho menor que la concentración hallada en diez puntos de toma de muestras de San Luis (estado de Missouri), ciudad eminentemente industrial. Los datos fueron recogidos por Dzubay. (Robert K. Stevens, de EPA, obtuvo la fotografía.)

partículas de carbono, pero las ineficaces estufas de carbón y leña que calientan muchos hogares estadounidenses sí lo hacen.

Las partículas carbonadas son una combinación de moléculas de hollín (carbono puro) y complejos orgánicos (basados en el carbono). Al igual que las partículas de sulfato, difunden la luz y reducen la visibilidad; absorben también la luz, causando el tono obscuro de las brumas producidas por partículas que contienen carbono. El hollín no parece representar, por sí mismo, ninguna amenaza contra la salud, pero sí pueden hacerlo algunas de las moléculas orgánicas que se le adhieren. Por otro lado, las moléculas orgánicas pueden, al menos, desempeñar un papel positivo: caracterizan, posiblemente, los combustibles que las producen y sirven así de pistas para identificar la fuente del carbono.

Nuestros estudios y los de otros investigadores han mostrado que los compuestos de sulfatos y carbono producidos en las combustiones suelen constituir los componentes principales de las partículas pequeñas de la atmósfera de cualquier región geográfica de cierta extensión. De vez en cuando aparecen, sin embargo, substancias inesperadas. Los métodos descritos más arriba son apropiados para detectar y explicar tales anomalías.

Cierto mes de diciembre, hace algunos años, nos encontramos con la sorpresa de que el cloro daba cuenta de alrededor de un 20 por ciento de la masa de las partículas finas recogidas en puntos dispersos del Medio Oeste durante varios días. El cloro se halla en la atmósfera marina en forma de sal, pero no contribuye normalmente en más de 0,1 por ciento a las partículas del aire situado sobre los continentes. Sin embargo, todas las muestras de Wisconsin, Kansas, Missouri, Kentucky, Indiana y Ohio ofrecieron espectaculares subidas en el contenido de cloro, casi simultáneas.

Perplejos, consideramos varias fuentes posibles de cloro. Una de ellas: la sal (cloruro sódico) que se espolvorea sobre las carreteras después de una nevada; nuestras muestras presentaban los niveles de sodio que podría esperarse si el cloro hubiera procedido de la sal. Pero no había habido nevadas, ni se había arrojado sal en las carreteras vecinas a los puntos de estudio. La quema de vegetación elevaría ciertamente los niveles de cloro en la zona, pero aumentaría también los niveles de potasio y hollín; tampoco abundaban estas substancias. Las medidas de otras substancias revelaron que, en la mayoría de aspectos, el aire ofrecía una extraordinaria nitidez: las concentraciones de azufre, óxidos de nitrógeno y ozono eran mucho más bajas de lo normal, así como la concentración de sulfatos en la masa de partículas pequeñas.

Datos que inducían una sorprendente conclusión: en vez de representar un raro episodio de contaminación, el cloro indicaba una entrada, todavía más rara, de aire limpio. Los cálculos realizados por los investigadores del Centro Nacional de Investigación Atmosférica apoyaban nuestra hipótesis y sugerían que el aire marítimo había viajado desde el Océano Pacífico septentrional hacia el Sur, a través de Canadá y hasta el Medio Oeste.

Un suceso similar puso a prueba las aptitudes detectivescas de Thomas G. Dzubay, de la EPA. Después de recoger muchas muestras de partículas atmosféricas en San Luis, Missouri, observó que el aluminio, el potasio, el estroncio, el antimonio y el bario abundaban considerablemente más en una muestra que en las otras. Dzubay sabía que esos elementos concurren en los fuegos artificiales, y consultó su registro de fechas de recogida de las muestras. Efectivamente, habíase tomado la muestra anómala entre mediodía y medianoche del día 4 de julio (día de la independencia de los Estados Unidos).

Tal descubrimiento pone de manifiesto que la complejidad de las partículas, antaño un obstáculo infranqueable para su análisis, constituía una bendición: anotando los elementos o compuestos que se dan conjuntamente, los investigadores pueden deducir las materias que los originaron. Tal vez algún día el refinamiento de las herramientas del analista posibilite establecer no sólo que la combustión del carbón, u otros carburantes, es la responsable del tipo de partículas atmosféricas halladas en un determinado punto, sino también que dicha quema se produjo aquí o allí.

Mientras tanto, una avalancha de datos permite afirmar, sin ninguna duda, que la combustión de carburantes es la principal fuente de deposición ácida y de sedimentación de partículas. Tampoco cabe ya cuestionar que la contaminación viaja, atravesando las fronteras internacionales. Los organismos encargados de decidir la política a seguir por los gobiernos, la dirección de las industrias y los propios ciudadanos de todo el mundo tienen ante sí otro desafío: determinar qué medidas tomar, si alguna, para aumentar los controles de contaminación, cuánto dinero invertir y quién ha de pagar los costes.

Evolución de los cromosomas *B*

Considerados durante mucho tiempo como accesorios, se van acumulando pruebas en favor del carácter parásito de los cromosomas B. La posibilidad de convertirse en reservorios de variabilidad genética destaca su papel evolutivo

Manuel Ruiz Rejón, Carmelo Ruiz Rejón y José L. Oliver

En los últimos años ha cobrado un gran auge en biología el debate en torno al papel desempeñado por el egoísmo, o su contrario el altruismo, en la evolución de los seres vivos. Tuvo en ello que ver la publicación del libro de R. Dawkins *El gen egoísta*, en donde se sostiene que los organismos no son más que receptáculos temporales de sus genes egoístas, por lo que constituyen un nivel equivocado para el análisis evolutivo. La evolución vendría a ser una lucha entre genes, más que una lucha entre individuos. Desde el campo de la genética molecular se ha venido a proponer también la existencia, en los seres vivos, de ciertas secuencias de ADN que se comportan de manera egoísta; así, en el año 1980, L. E. Orgel y F. H. C. Crick, del Instituto Salk en la Jolla, por un lado, y C. Sapienza y W. F. Doolittle, de la Universidad de Dalhousie en Halifax, por otro, sugirieron que los elementos genéticos transponibles, llamados también transposones o genes saltadores, podrían ser de naturaleza parásita o "egoísta". El mecanismo de transmisión de estos elementos les permite acumularse en gran número y difundir copias de sí mismos por todo el genoma, sin que en la mayoría de los casos suponga ningún beneficio para el organismo que los alberga.

De todas maneras, la idea de la posible existencia de material genético egoísta no es nueva en absoluto. En 1945, G. Östergren sugería, en la revista *Botaniska Notiser*, que cierto tipo de cromosomas, llamados accesorios, supernumerarios o simplemente *B* (para distinguirlos de los cromosomas normales o *A*) se comportaban como parásitos celulares, puesto que se acumulaban en la célula sin ofrecerle ningún beneficio patente. Más tarde, R. B. Matthews y R. B. Jones, de la Universidad de Gales, postularían también el carácter egoísta de los *B*.

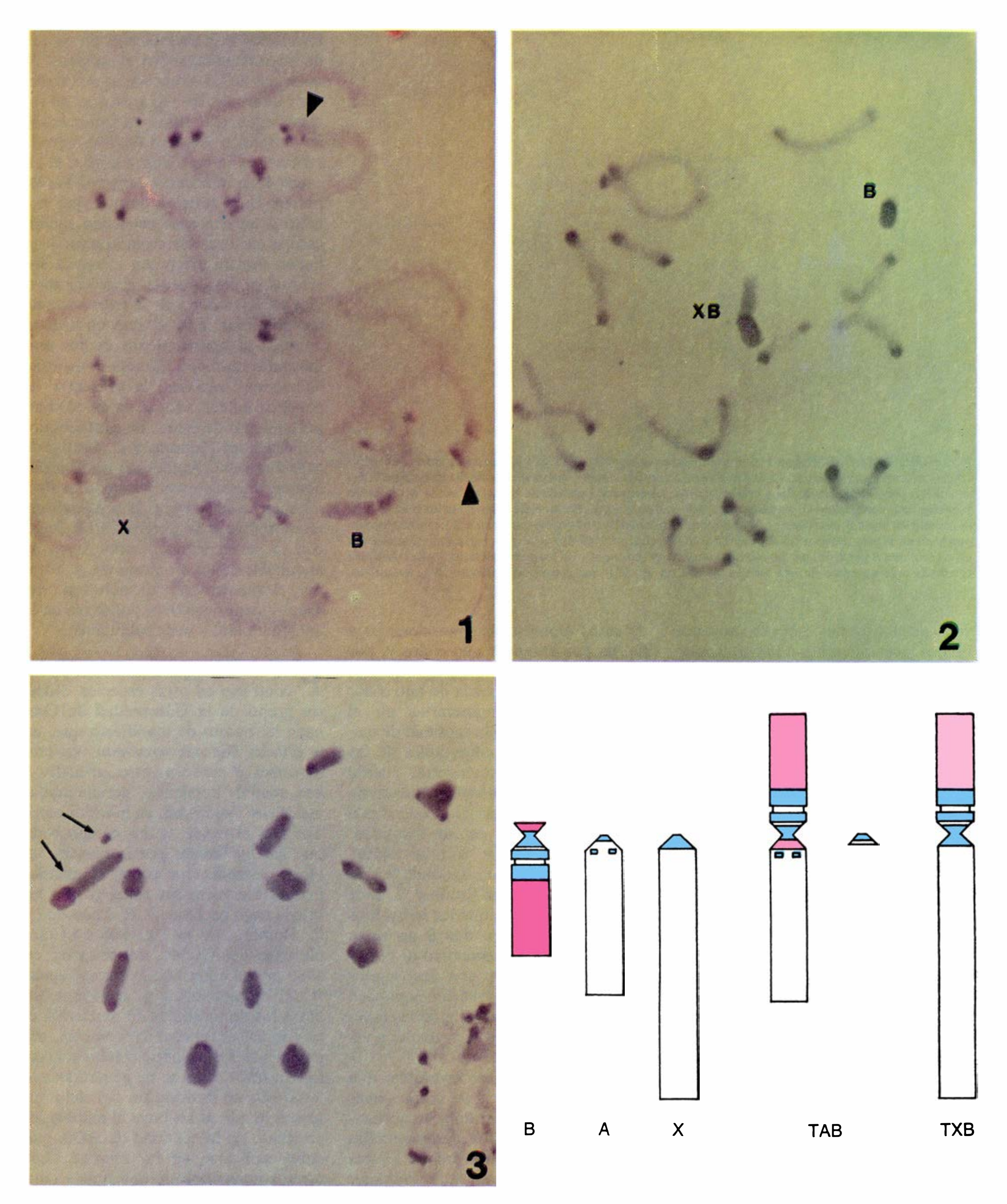
Los cromosomas normales (*A*) son, como su nombre indica, corpúsculos coloreados que pueden observarse en los núcleos celulares y portan la información hereditaria. Están compuestos mayoritariamente de ADN y proteínas. En la metafase mitótica, los cromosomas se hallan formados por dos cromátidas idénticas en su morfología. Su número suele ser constante en los individuos de la misma especie, siendo variable, sin embargo, entre especies distintas. Así, el hombre presenta normalmente 23 pares de cromosomas, 10 el maíz y 7 el centeno, por citar algunos ejemplos. Durante la meiosis, las distintas parejas de cromosomas suelen aparearse entre sí formando los llamados bivalentes. La descripción del número, tamaño y morfología de los cromosomas de una especie constituye su cariotipo. Los cromosomas suelen transmitirse fielmente de generación en generación siguiendo las leyes de Mendel [véase "Comportamiento cromosómico", de J. R. Lacadena; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1985].

Los cromosomas *B* se suman al cariotipo normal y no suelen mostrar homología con ningún cromosoma del mismo, siendo tan excepcionales que ni siquiera siguen las leyes de Mendel. Como veremos en este trabajo, los cromosomas *B* pueden constituir una vía alternativa para la organización del material hereditario, pudiéndoselos considerar verdaderos parásitos, ya que son capaces de mantenerse en las poblaciones gracias exclusivamente a sus peculiares mecanismos de transmisión. Ante ellos, sin embargo, se abren diversas perspectivas evolutivas; por ejemplo, transformarse en simbiontes a través de un proceso de evolución conjunta con el genoma *A* o bien reintegrarse en la dotación cromosómica *A*, y así reciclar el ADN que albergan.

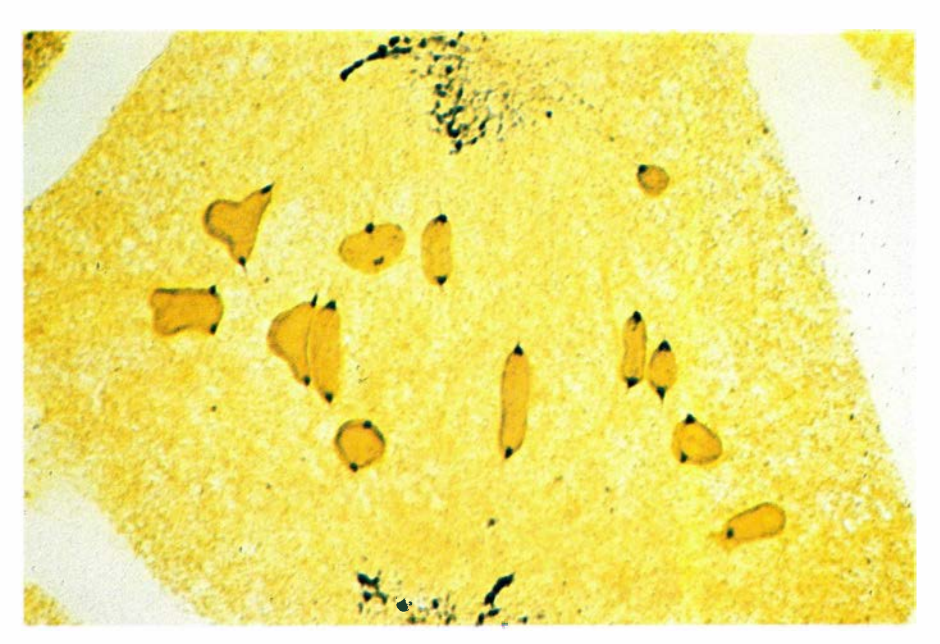
Los cromosomas *B* fueron detectados por A. E. Longley en 1927. Los descubrió en el maíz. Desde entonces se han observado en más de un millar de especies vegetales y en unas 260 animales, incluido el hombre. Uno de sus rasgos diferenciales y característicos es la mayor variación que muestran en comparación con los cromosomas *A*. Su número varía notablemente entre las poblaciones de una misma especie, entre los individuos de una misma población e incluso entre las células, tejidos y órganos de un mismo individuo. El número máximo de cromosomas *B* que una especie puede soportar es también muy variable: llega incluso a la cincuentena, superando a veces el número de los cromosomas normales.

La variación no se limita al número. En muchas ocasiones diverge también el tamaño de los distintos cromosomas *B* de una determinada especie. Con respecto a su origen, envuelto todavía en el misterio, las hipótesis que gozan de mayor aceptación proponen que aparecen por duplicación total o parcial de algún cromosoma. De hecho, diversos estudios han puesto de manifiesto que la proporción de bases nitrogenadas de su ADN es similar a la que caracteriza a los cromosomas normales. Así, por ejemplo, G. A. Dover y S. A. Henderson, de la Universidad de Cambridge, encontraron que en el saltamontes *Myrmeleotettix maculatus* el contenido en guanina y citosina era el mismo en los cromosomas *A* que en los *B*. Sin embargo, estos últimos han debido divergir de los *A* que los originaron, como lo indica la ausencia de apareamiento meiótico entre ambos tipos de cromosomas.

Entre otras cosas, los cromosomas *B* llaman la atención porque no ejercen efectos cualitativos sobre el fenotipo (al menos cuando se encuentran en dosis bajas, por ejemplo; más adelante matizaremos este concepto). En la ma-



1. TRANSLOCACIONES ENTRE LAS DOTACIONES CROMOSOMICAS *A* y *B*. La idea de la posible existencia de material genético egoísta no es nueva en absoluto. En 1945 G. Östergren sugería que cierto tipo de cromosomas, llamados accesorios, supernumerarios o simplemente *B* (para distinguirlos de los normales o *A*) se comportaban como parásitos celulares, puesto que se acumulaban en la célula sin ofrecerle ningún beneficio patente. Para algunos investigadores, los cromosomas *B*, originados probablemente a partir del genoma *A*, pueden volver a integrarse en el mismo. Uno de estos mecanismos de integración podrían ser las translocaciones entre los cromosomas *A* y *B*. La figura muestra células de ciertos individuos del saltamontes *Eyprepocnemis plorans* portadores de tales translocaciones: en *1* una célula con *1B* (el cromosoma más pequeño) y sin translocaciones; *2* corresponde a un individuo en el que parte del cromosoma *B* se ha translocado al cromosoma *X*; *3* pertenece a un individuo en el que parte del cromosoma *B* se ha translocado a uno de los cromosomas autosómicos (*flecha*). El diagrama (*abajo, derecha*) ilustra las características de los cromosomas que intervienen en las translocaciones (*B*, *A*, *X*) así como las características de tales cromosomas una vez translocados. (Las fotos y esquemas nos los ha cedido N. Henriques-Gil, de la Universidad Complutense de Madrid).



2. CROMOSOMA *B*. Distínguese en el estadio de metafase-I de una célula sexual de un macho del saltamontes *Eyprepocnemis plorans*. El material se ha coloreado con una nueva técnica de tinción con plata desarrollada por J. Sánchez Rufas y colaboradores, adscritos al Instituto de Biología Celular del Consejo Superior de Investigaciones Científicas cuya sede está en Madrid. En la célula se aprecian los cromosomas de la dotación normal, constituida por 11 bivalentes autosómicos y el cromosoma sexual (*X*), que ha migrado precozmente al polo superior (*en la fotografía, abajo*); en el polo inferior (*en la fotografía, arriba*) se observa un cromosoma *B* pequeño, que ha migrado también precozmente. En los polos celulares, y ello constituye el aspecto más novedoso de esta técnica, se tiñe un material que podría corresponder al pericentriolo.

yoría de las especies, estos cromosomas no producen ningún cambio en la morfología externa de los individuos. Así, por ejemplo, J. P. M. Camacho, A. R. Carballo y J. Cabrero, de la Universidad de Granada, en un amplio estudio morfométrico realizado en 1980, observaron que los individuos portadores de cromosomas *B*, del saltamontes *Eyprepocnemis plorans*, no diferían significativamente, en toda una serie de caracteres morfológicos externos, de los individuos carentes de esos cromosomas. Hay, sin embargo, excepciones. La planta *Haploppaus gracilis* evidencia el efecto cualitativo fenotípico de los cromosomas *B*, concretamente en el color del fruto. (Las plantas normales tienen los frutos de color rojo-marrón, mientras que en las plantas con cromosomas *B* son de color púrpura obscuro.) Los cromosomas parásitos afectan, por contra, a toda una serie de caracteres cuantitativos; verbigracia, tasa de desarrollo, vigor o fertilidad.

Los efectos que los *B* ejercen sobre esos rasgos pueden ser desfavorables, nulos o incluso ventajosos, cuando se encuentran en dosis bajas; pero siempre son desfavorables cuando aumenta su número. Varía, con la especie, el número de cromosomas *B* que puede considerarse como dosis alta o baja. Así, en el centeno, en el que se ha estudiado detenidamente el efecto de estos cromosomas, por dosis baja habría que entender uno o dos y, por dosis alta, cuatro o más. Los efectos que produce la presencia de uno o dos cromosomas supernumerarios en el peso de las semillas, la cantidad de materia seca o las ramificaciones de las plantas son nulos; por contra, cuando el número de cromosomas *B* aumenta por encima de cuatro, se produce una notable reducción de su fertilidad. Algo similar ocurre con la liliácea *Allium sphaerocephalon*, donde dos de los autores (M. Ruiz Rejón y C. Ruiz Rejón) encontraron que los individuos portadores de uno o dos *B* no veían mermado su vigor vegetativo ni su fertilidad, comparados con los sujetos normales. Estas observaciones pueden generalizarse a la mayoría de las especies con cromosomas *B*, animales y vegetales.

De entre los efectos favorables que comporta la presencia de cromosomas *B* a dosis bajas, citaremos la aceleración de la germinación de las semillas y el ritmo de crecimiento de ciertas plantas. En el centeno, M. J. Puertas y R. Carmona, de la Universidad Complutense de Madrid, hallaron que esos cromosomas favorecían la tasa de crecimiento del tubo polínico.

Ha sido, sin embargo, en el dominio celular donde se ha detectado un mayor número de cambios provocados por la presencia de cromosomas *B*. Uno de los efectos más investigados ha sido el de su influencia sobre el número de quiasmas de los cromosomas *A*. (Se llaman quiasmas los lugares que se corresponden con sitios de intercambio cromosómico observables durante la profase meiótica.) Una vez más, el alcance de la incidencia varía con las especies. Unas reflejan un aumento notable o un descenso asimismo significativo; en otras los cromosomas *B* no tienen ningún efecto en términos absolutos, si bien pueden provocar cambios en la varianza de la frecuencia de los quiasmas. Los *B* pueden afectar también al apareamiento de los cromosomas normales durante la meiosis: en algunas especies, la presencia de aquéllos induce anomalías en el comportamiento de éstos. En este sentido, J. Fernández Piqueras y C. Sentís, de la Universidad Autónoma de Madrid, han encontrado en el saltamontes *Pycnogaster cucullata* que la presencia de cromosomas *B* se puede correlacionar con la ocurrencia de varios tipos de anomalías en los cromosomas *A*: roturas cromosómicas, disminución del apareamiento efectivo, polisomía en la línea germinal y endopoliploidía.

Pero también aquí asistimos al efecto contrario en otras especies. Nuestro grupo de la Universidad de Granada ha puesto de manifiesto que, en la liliácea *Dipcadi serotinum*, los cromosomas *B* parecen verse asociados a una menor frecuencia de anomalías meióticas. Asimismo, en híbridos entre distintas especies se ha comprobado que los *B* ejercen, por lo común, un efecto estabilizador sobre el apareamiento meiótico; sin embargo, en híbridos trigo-centeno, J. R. Lacadena y C. Romero, de la Universidad Complutense de Madrid, encontraron en 1980 que el efecto de los cromosomas *B* del centeno sobre el apareamiento entre los cromosomas de ambas especies podía ser supresor o promotor, dependiendo del genotipo celular concreto. En otros casos se ha advertido que los *B* dilatan la duración del ciclo mitótico, lo que se atribuye al notable incremento de la cantidad de ADN que debe replicarse en la interfase. Los efectos nucleotípicos, detectados también en ciertas especies, modifican algunas características del núcleo celular; alteran, por ejemplo, la proporción entre histonas y ADN, el volumen de los cromosomas *A* y la síntesis de ARN y proteínas.

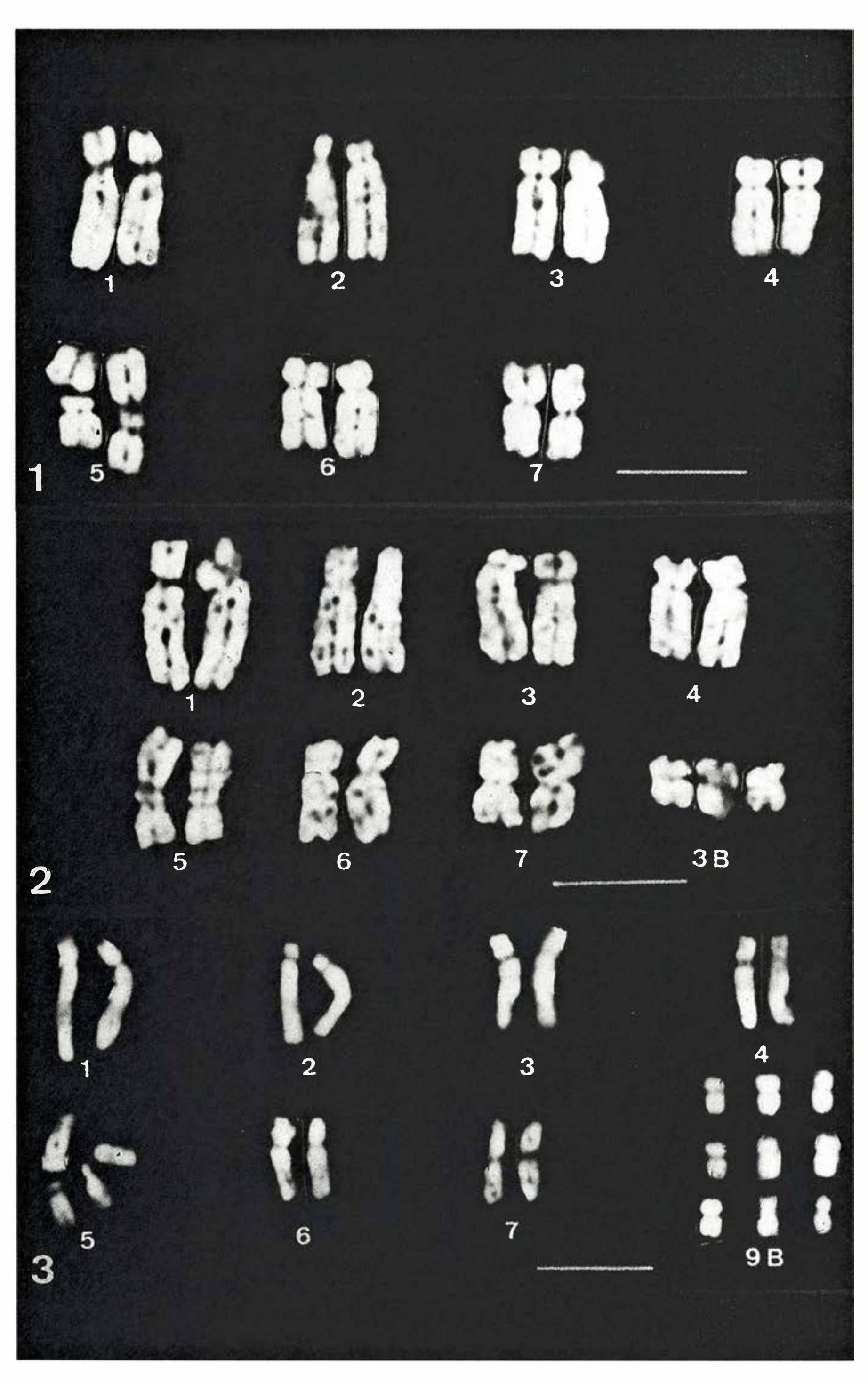
Muchos de los cambios provocados por los cromosomas *B*, en particular los

efectos nucleotípicos recién aludidos, parecen indicar que estos cromosomas intervienen en la regulación de la actividad genética de los normales. Si ello ocurre, podría verse afectada la síntesis de ciertas proteínas y enzimas. Pero la cuestión no ha recibido todavía atención suficiente para poner a prueba la hipótesis. En 1976, dos de nosotros (J. L. Oliver y M. Ruiz) iniciamos un estudio en la liliácea *Scilla autumnalis*, para averiguar la posible asociación de los cromosomas *B* con la aparición de alguna enzima particular. (Para entonces se sabía ya que el perfil electroforético de proteínas totales de la hemolinfa de la langosta *Locusta migratoria* era distinto según ésta portara o no cromosomas *B*.) A tal fin estudiamos una población natural de esa especie, en la que se podía encontrar individuos con 0, 1, 2, 3 y hasta 9 cromosomas *B*. Se determinaba, de cada individuo, su cariotipo y su patrón electroforético de isoenzimas (es decir, distintas formas moleculares de una enzima). No tardamos en hallar que la aparición de una isoenzima de esterasa, la E-1, dependía de la presencia de un cromosoma *B*, por lo menos, en el cariotipo.

La asociación entre *B* y E-1 se vio confirmada en 1982, cuando, en colaboración con F. Posse, alumna posgraduada de nuestro laboratorio, estudiamos bulbos mosaico de esta planta que, debido a la inestabilidad mitótica, tenían unas raíces con cromosomas *B* y otras sin ellos. Tras determinar, para cada raíz, la presencia o ausencia de *B* y su patrón electroforético, volvimos a observar idéntica asociación: todas las raíces dotadas de cromosomas *B* portaban, a su vez, la isoenzima E-1; en ausencia de dichos cromosomas, faltaba también E-1.

A tenor de la interpretación más obvia de esos hallazgos, el gen estructural que codificaba la isoenzima se hallaría en los cromosomas *B*. Sin embargo, el análisis de bulbos mosaico para el número de *B* y heterocigotos para E-1 nos indujo a rechazar esa hipótesis. De acuerdo con estos resultados, el gen *Est-1* parece estar localizado en alguno de los cromosomas *A*, y la asociación entre los *B* y la isoenzima E-1 se explicaría en razón de una interacción de tipo regulador. Dicho de otro modo, la presencia de los cromosomas *B* activaría el gen estructural que determina la isoenzima. Ese efecto activador de los *B* no es general, sino específico, pues ninguna de las 15 isoenzimas que llevamos estudiadas hasta la fecha se ven afectadas. A este propósito, conviene advertir la naturaleza heterocromática "facultativa" de los *B* de *S. autumnalis*, ya que uno de los efectos asociados con la presencia de cromosomas o zonas heterocromáticas es la acción (represora o activadora) sobre genes estructurales.

De todas formas, el que los cromosomas *B* ejerzan algún efecto sobre el fenotipo de los individuos que los portan no significa que tal sea la función biológica de los cromosomas implicados. No todo efecto es una función. Efecto de la operación del corazón es, por ejemplo, desplazar los pulmones en la cavidad torácica, pero no es esa,



3. CROMOSOMAS *B* de *Scilla autumnalis*. Los cariotipos ofrecidos en la figura corresponden a tres individuos de dicha especie. La planta *1* presenta el cariotipo normal (diploide) de la especie, constituido por siete parejas de cromosomas ($2n = 14$); en la planta *2* se observan tres pequeños cromosomas *B* metacéntricos, en la parte inferior derecha, además de los cromosomas de la dotación normal ($2n = 14 + 3B$); por último, la planta *3* muestra nueve cromosomas supernumerarios ($2n = 14 + 9B$). Los *B* de esta especie varían, no sólo de una población a otra y de un individuo a otro, sino también en un mismo individuo.

obviamente, la función cardíaca ni la razón por la que ha evolucionado. En esa línea de razonamiento, todas las características que se han ido asociando con los cromosomas *B* pueden considerarse, de momento, meros efectos, sin que a ninguna de ellas debamos atribuirle la categoría de función propia, es decir, el motivo de su existencia.

Quizás el rasgo más llamativo de los cromosomas *B* sea su peculiar modo de transmisión, que no se ajusta a las leyes de Mendel. Ello se debe a que, no obstante disponer de mecanismos de replicación exactos y zonas centroméricas adecuadas para unirse a los husos acromáticos de las células en división, muestran una particular propensión a sufrir anomalías en los procesos de reparto durante las divisiones celulares. Tales anomalías son de dos tipos: la no disyunción de las cromátidas en anafase y la deriva meiótica con segregación preferencial del cromosoma *B* hacia los núcleos funcionales, bien por vía masculina, bien por vía femenina.

TIPOS PRINCIPALES

TIPOS SECUNDARIOS

16

1 4 12 14 15 17 26 3

2 21 22 23 24 25

5 6 7 8 13 18 19 20 9 10 11

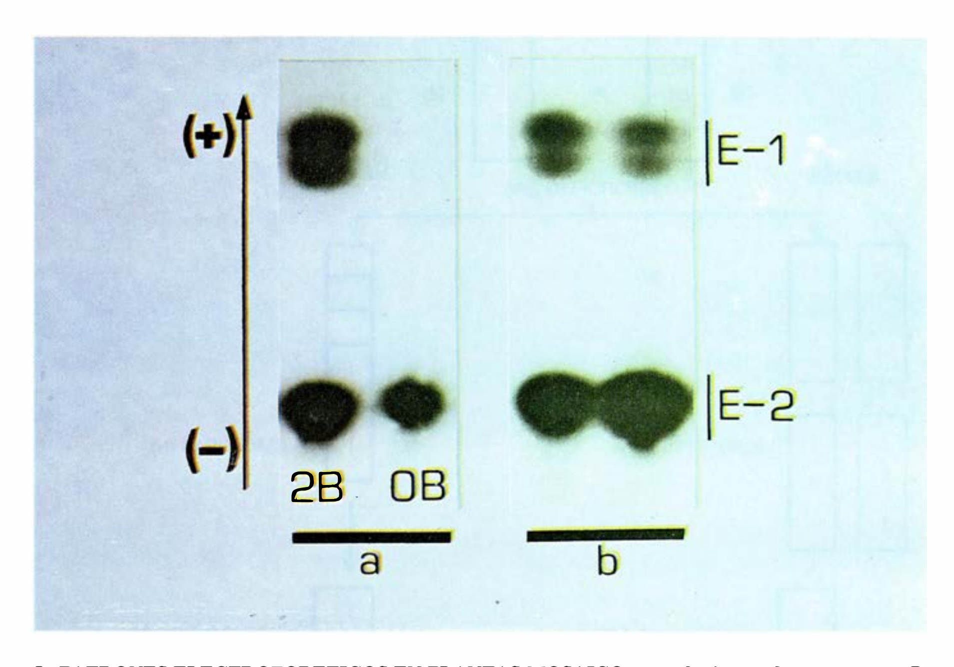
4. DIFERENTES TIPOS DE CROMOSOMAS *B*. Una de las características diferenciales de estos cromosomas *B* es la variedad de tipos (dos o más) con que pueden presentarse en algunas especies. N. Henriques-Gil, J. L. Santos y P. Arana, de la Universidad Complutense de Madrid, han descubierto una notable variedad de ellos en el saltamontes *Eyprepocnemis plorans*. En este esquema se observan hasta 26 tipos de *B* detectados por los autores. Los tipos principales coinciden con los cromosomas *B* más frecuentes, y los secundarios con los menos abundantes. Según puede apreciarse, los tipos difieren no sólo en tamaño y morfología, sino también en la cantidad de zonas heterocromáticas (*zonas obscuras*) y eucromáticas (*zonas claras*).

En razón de esas anomalías resulta que, por un lado, diferentes células de un mismo individuo presentan un número distinto de cromosomas *B* y, por otro, surgen descendientes –de cruzamientos entre individuos portadores de cromosomas *B*– con un número mayor de tales cromosomas que el esperado de acuerdo con las expectativas mendelianas, lo que conduce a un incremento de la frecuencia de *B* en la población. Se trata, pues, de un eficaz mecanismo de acumulación que da lugar a la aparición de individuos con un elevado número de cromosomas *B*. De hecho, en todas las especies en las que se han cuantificado las tasas de transmisión de los cromosomas *B* se han hallado mecanismos de acumulación en virtud de los cuales dichos cromosomas pasan a la descendencia con una frecuencia más alta que la inferida de las leyes de Mendel. Esos mecanismos de acumulación, en particular los debidos a no disyunción, parecen estar controlados por genes situados en el propio cromosoma *B*, según se ha podido poner de manifiesto en el maíz y en el centeno. Resulta interesante que los únicos genes localizados hasta ahora en los cromosomas *B* sean precisamente los que controlan su transmisión no mendeliana. Todos los demás intentos por localizar genes o segmentos específicos de los cromosomas *B* que controlen algunos de los efectos antes mencionados han resultado baldíos.

Varios investigadores han observado que la frecuencia con que se transmiten los cromosomas *B* puede venir condicionada por distintos factores genéticos y ambientales. En este sentido, W. R. Carlson descubrió, en 1969, la existencia de un factor genético situado en los cromosomas *A* del maíz que suprimía la deriva meiótica de los *B*. Más recientemente, M. W. Shaw y G. M. Hewitt, de la Universidad de East Anglia, por un lado, y U. Nur y B. L. H. Brett, de la Universidad de Rochester, por otro, han identificado factores genéticos con efectos similares en poblaciones de saltamontes y de un insecto homóptero, respectivamente. Asimismo, se ha observado que las bajas temperaturas reducían substancialmente la tasa de transmisión de los cromosomas *B* en el saltamontes de la especie *Myrmeleotettix maculatus*.

Considerados los mecanismos de transmisión y su manifiesta falta de función biológica, ¿qué es lo que permite la persistencia de los cromosomas *B* en las poblaciones naturales? De

acuerdo con el modelo "heterótico", los cromosomas *B* se mantienen gracias a la ventaja adaptativa que confieren a sus portadores cuando se encuentran en dosis bajas. Semejante ventaja de que disfrutarían los individuos dotados de escasos cromosomas *B* compensaría la pérdida, por selección natural, de individuos portadores de un elevado número de ellos. Según un segundo modelo, llamado "parasitario", los cromosomas *B* pervivirían en las poblaciones naturales por la exclusiva virtud de sus eficaces mecanismos de acumulación, que compensan, asimismo, las pérdidas sufridas por selección natural en contra de los sujetos con alto número de dichos cromosomas. Afirma también este modelo que los individuos con bajo número de *B* se hallarían también en desventaja con respecto a los individuos normales, aunque, en ciertos casos, tales efectos negativos podrían ser muy leves, estando muy cercanos al punto de neutralidad adaptativa.



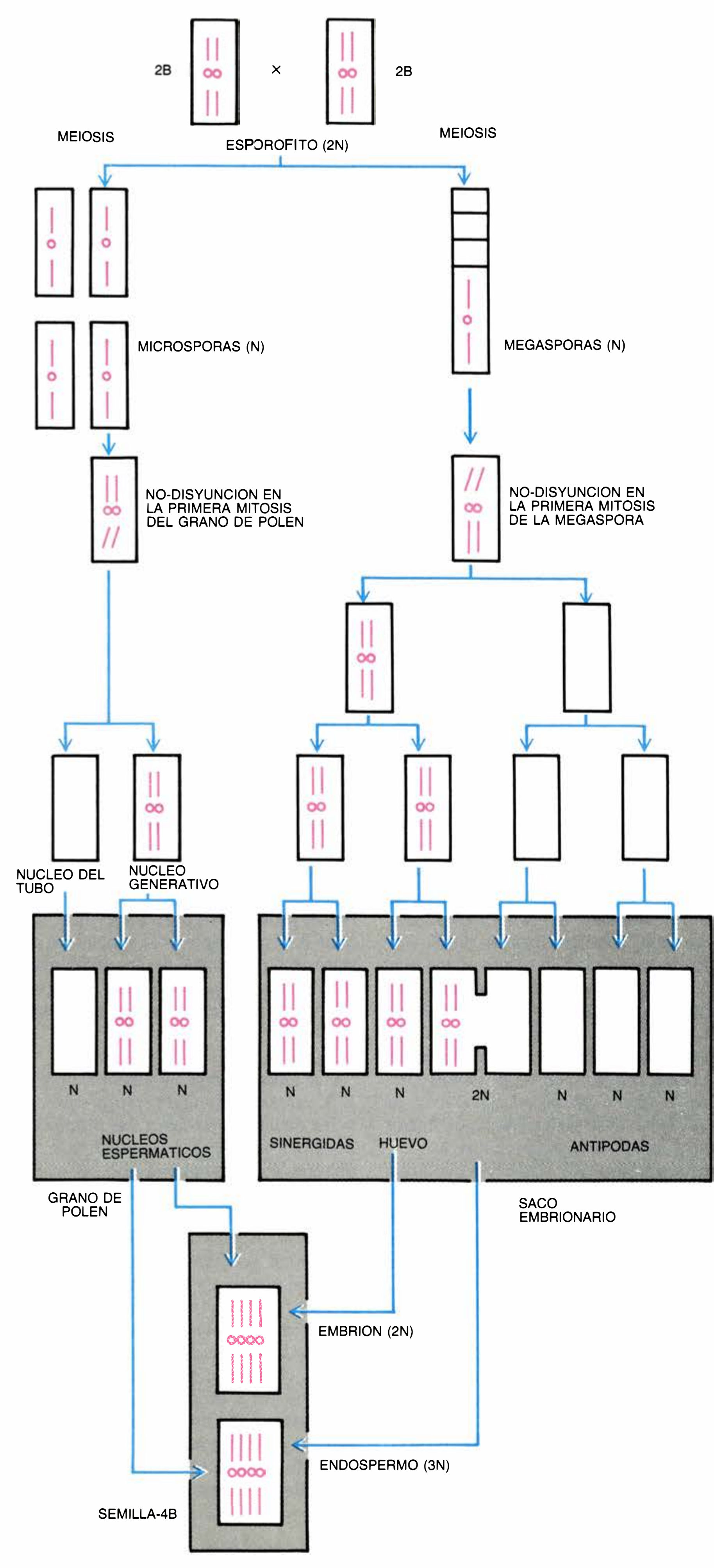
5. PATRONES ELECTROFORETICOS EN PLANTAS MOSAICO para el número de cromosomas *B*. Dos bulbos de *Scilla autumnalis* (*a*) presentan un número inestable de tales cromosomas (de 0 a 2), por lo que tienen raíces con 0, 1 o 2 cromosomas *B*. Al propio tiempo, esos bulbos son heterocigotos para el gen que codifica la isoenzima de esterasas E-1; si el locus *Est-1* se ubicara en los cromosomas *B*, cabría esperar que apareciesen raíces con 0, 1 o 2 bandas electroforéticas en la isoenzima E-1. Sin embargo, lo que los autores encontraron fueron raíces sin ninguna banda de E-1 y raíces con dos bandas. En ningún caso se hallaron raíces con una banda que pudiesen corresponder a la presencia de un cromosoma *B* en la raíz. Un tercer bulbo (*b*), mosaico para 0-1*B*, mostraba asimismo en muchas de sus raíces un fenotipo dibandeado para E-1. Estos resultados indican que el gen estructural *Est-1* no está localizado en los cromosomas *B*.

Los datos experimentales a favor del modelo "heterótico" son de tres clases. Comencemos por los ejemplos excepcionales, como el de *Lolium* (ballico o raigrás), donde se ha demostrado que los *B* confieren un mayor valor adaptativo (en condiciones experimentales de laboratorio) a los sujetos que los portan. El segundo tipo de datos proviene de la comprobación, verificada en repetidas ocasiones, de que los cromosomas *B* cambian la frecuencia de quiasmas, generalmente aumentándola, en los cromosomas normales. Fundándose en que este cambio provocaría un aumento de la variabilidad poblacional y que ello podría suponer alguna ventaja adaptativa, los defensores de esta hipótesis sugieren, siguiendo al citogenetista inglés C. D. Darlington, que los cromosomas *B* se mantienen en la naturaleza porque constituyen una ventaja para la población general, aun cuando puedan ser perjudiciales para los individuos que los portan. El tercer tipo de datos procede de las observaciones de los patrones de distribución de los *B* en las poblaciones naturales: se hallan, por lo común, en frecuencias más elevadas allí donde el medio es más favorable para la especie, lo que algunos autores interpretan como signo del valor adaptativo que confieren a sus portadores.

Los defensores del modelo "parasitario" rebaten todos y cada uno de los argumentos anteriores. El caso de los cromosomas *B* de *Lolium*, más que una regla, constituye una excepción; además, los datos proceden de condiciones de laboratorio, que no pueden siempre extenderse a las condiciones naturales. Ocurre, por contra, que la situación habitual en la naturaleza (preferentemente entre saltamontes, roedores y liliáceas) es que los individuos con bajo número de cromosomas *B* presentan un valor adaptativo inferior (o como mucho igual) a sus congéneres sin *B*. Asimismo, para estos autores es erróneo otorgar un significado adaptativo a los *B* por el mero hecho de que aumenten la frecuencia de quiasmas en los cromosomas *A*. Apoyan su rechazo en dos razones: primera, no se ha podido comprobar nunca que altas frecuencias de quiasmas vayan asociadas a una mayor variabilidad de la población o a un robustecimiento del potencial evolutivo de la especie; segunda, el que la presencia de cromosomas *B* ejerza un efecto positivo para la población, siendo negativa para los individuos portadores, supondría aceptar que la selección es capaz de prever el futuro. Por último, la abundancia de cromosomas *B* en los hábitats más favorables indicaría más bien que, bajo condiciones óptimas, la especie puede tolerar la "carga" que supone dicha presencia, derroche impensable, por el contrario, en condiciones adversas.

Además de los datos experimentales acerca de los eficaces mecanismos de acumulación que tienen los *B*, contamos ya con datos de simulación en ordenador obtenidos por R. B. Matthews y R. B. Jones que apoyan el modelo parasitario. El seguimiento de la dinámica del proceso de acumulación de cromosomas *B* a lo largo de las generaciones corrobora que el equilibrio entre los procesos de deriva meiótica, debida a segregación preferencial, y de selección en contra de los individuos con *B* basta para justificar el mantenimiento de tales cromosomas en las poblaciones.

Así pues, aunque algunos resultados empíricos puedan interpretarse a la luz de ambos modelos, las pruebas a favor del heterótico son mucho más indirectas y especulativas que las aportadas por el parasitario. Si los cromosomas *B* son parásitos, es decir, si forman parte del ADN egoísta, como los elementos genéticos transponibles, su mantenimiento en las poblaciones naturales dependerá sólo de sus peculiares mecanismos de transmisión y no de sus supuestos efectos fenotípicos favorables. No parece, pues, necesario buscarle ninguna función biológica a los cromosomas *B*. En el caso de los elementos genéticos móviles, su capacidad de replicación autónoma y de difusión por todo el genoma basta para explicar



su presencia en los organismos superiores; en el de los cromosomas *B*, sus eficaces mecanismos de acumulación a lo largo de las generaciones bastarían igualmente para explicar su presencia en las poblaciones naturales. Lógicamente, esto no quiere decir que, en el transcurso de su evolución, los *B* no lleguen a adquirir alguna función. Lo mismo que ciertos elementos genéticos móviles pueden adquirir genes que confieren resistencia contra los antibióticos, por ejemplo, algunos cromosomas *B* podrían adquirir, en su proceso de diferenciación, alguna función con significado biológico, que diera lugar quizás a alguno de los efectos citados más arriba para esos cromosomas. Ahora bien, dicha función no sería imprescindible para su supervivencia y propagación: el cromosoma *B* podría haberse mantenido en virtud de sus mecanismos de acumulación.

De acuerdo con lo expuesto, además de genes egoístas, habría también *cromosomas egoístas*. Tales elementos serían conjuntos de secuencias, o quizá de genes, que, organizados en cromosomas, procurarían únicamente su propia supervivencia, con independencia de sus efectos sobre el organismo que los alberga. Sobre tales cromosomas egoístas operarían dos tipos de selección. Cuando se acumulan más allá de cierto límite, la carga que suponen hace entrar en juego la selección darwinista clásica, es decir, la selección natural o fenotípica, que tiende a eliminar los individuos portadores de un número excesivo de *B*. Ya hemos dicho que el equilibrio entre este segundo tipo de selección y el proceso de acumulación por deriva meiótica explica, por sí solo, el mantenimiento de los cromosomas *B* en las poblaciones naturales.

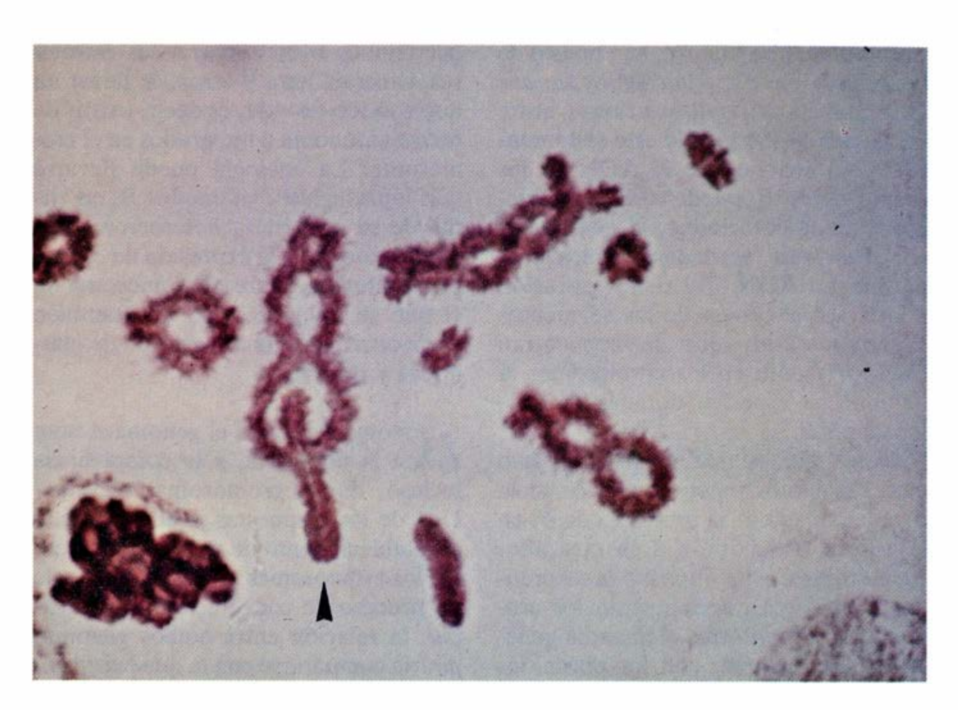
En segundo lugar, mientras tales elementos se mantengan en dosis bajas, y siempre que no adquieran alguna función biológica o efecto sobre el fenotipo, se encontrarán sometidos exclusivamente a una selección intragenómica: la selección derivada de la competencia entre los distintos elementos que componen el genoma. Este tipo de selección favorecerá todas aquellas mutaciones que supongan una mejora del mecanismo de acumulación de los *B*,

6. TRANSMISION HEREDITARIA de los cromosomas *B*. Dicha transmisión no sigue las leyes de Mendel porque no se produce en ellos la disyunción mitótica o porque se da una segregación preferencial de los mismos *B* hacia los núcleos que van a originar, tras la meiosis, los gametos funcionales. Ilustramos la transmisión de los cromosomas *B* del centeno en los gametofitos masculino y femenino de una planta que presenta dos de esos mismos cromosomas.

primando así su propagación. La selección intragenómica impulsa, de ese modo, el proceso de evolución de los cromosomas supernumerarios, a través de cual van mejorando continuamente sus mecanismos de acumulación, lo que les permitirá obviar, cada vez con mayor eficacia, las reglas mendelianas de transmisión.

Los factores que controlan la transmisión de los cromosomas *B* se hallan localizados en esos mismos cromosomas, y se ha observado que muchas de las variaciones estructurales que sufren influyen en su capacidad de transmisión. Esta evolución del mecanismo de acumulación podría dar lugar, pues, a la sustitución de unos tipos de *B* por otros, fenómeno observado en algunas poblaciones de plantas y animales.

Ahora bien, además de los genes o segmentos de cromosomas implicados en la transmisión hereditaria, los cromosomas *B* encierran presumiblemente otro material genético que no tiene nada que ver con tal mecanismo. ¿Qué ocurre con dicho material? Si, como parece probable, los cromosomas *B* se originan por duplicación total o parcial de algún cromosoma *A*, su ADN será, en principio, material genético redundante. Mientras los cromosomas *B* se mantengan en dosis bajas y no lleguen a constituir una carga para la célula, dicho ADN redundante escapará a la selección fenotípica. Cabe esperar, pues, que dicho ADN acumule un gran número de mutaciones, tal como suele ocurrir en otros tipos de material genético redundante.



7. CROMOSOMAS *B* Y SEGMENTOS SUPERNUMERARIOS. En ocasiones un segmento cromosómico puede mostrar una destacada condensación diferencial en la interfase, por cuya razón recibe el apelativo de heterocromático. En muchos animales y algunas plantas, estos segmentos se presentan como un material extra añadido al complemento cromosómico normal de una especie. Se desconoce el origen de tales segmentos cromosómicos. Una de las hipótesis trata de relacionar su origen con los cromosomas *B*, tal vez a través de fenómenos de translocación. La microfotografía muestra una profase meiótica de un macho del saltamontes *Chorthippus jucundus*. El bivalente de mayor tamaño presenta en el brazo corto de uno de los dos homólogos un segmento supernumerario (*flecha*), más intensamente teñido que el resto de la cromatina. (La preparación microscópica y la fotografía fueron realizadas por Carlos García de la Vega y Julio Sánchez Rufas.)

En efecto, un gen, cuando se duplica, puede divergir libremente del original por ser superfluo y, en consecuencia, no estar sujeto a las restricciones impuestas por la selección natural. Este proceso de deriva genética puede tomar dos caminos alternativos: adquirir una función distinta por parte de uno de los genes duplicados, dando así origen a un gen nuevo, o inactivarse, dando lugar a un pseudogén. Los pseudogenes poseen secuencias homólogas a las de los genes funcionales de los que proceden por duplicación, pero contienen mutaciones que impiden la traducción en un polipéptido funcional.

Un proceso similar podría ocurrir con el ADN redundante que da origen a los cromosomas *B*. Dicho ADN podría acumular distintos tipos de mutaciones, muchas de las cuales podrían ser incluso de las que resultan prohibidas para los cromosomas *A*, tales como las reordenaciones cromosómicas más o menos drásticas. Ello explicaría la amplia variedad de tamaños y formas de cromosomas *B* que hallamos en distintas especies. Mención especial entre estas mutaciones merecen los cambios que conducen a la heterocromatinización de los cromosomas *B*. (Mediante este proceso, la cromatina se hace más densa y compacta, por lo que se la puede observar más intensamente teñida en determinadas fases del ciclo celular. Se cree que en este estado la cromatina es genéticamente inactiva.) Tanto la propia redundancia que supone la presencia de *B*, como algunas de las mutaciones que en ellos pueden producirse, podrían acarrear efectos deletéreos para el organismo, que se evitarían a través de la eliminación del cromosoma *B*, mediante su inactivación total o parcial vía un proceso de heterocromatinización. Al mismo tiempo, hay que tener en cuenta que, una vez heterocromatinizado e inactivado, por tanto, el cromosoma *B* se volvería susceptible de sufrir nuevas mutaciones. Lo que explicaría el carácter heterocromatínico de los cromosomas *B* de muchas especies. De ese modo, ambos mecanismos –la selección intragenómica (mejorando continuamente el proceso de acumulación) y la ausencia o el relajamiento de la selección natural (cuando los cromosomas *B* se encuentran en dosis bajas, que permite el establecimiento de una gran variedad de mutaciones)– impulsan la evolución de los cromosomas *B*, haciendo que éstos se distingan, cada vez más, del cromosoma *A* del que derivaron.

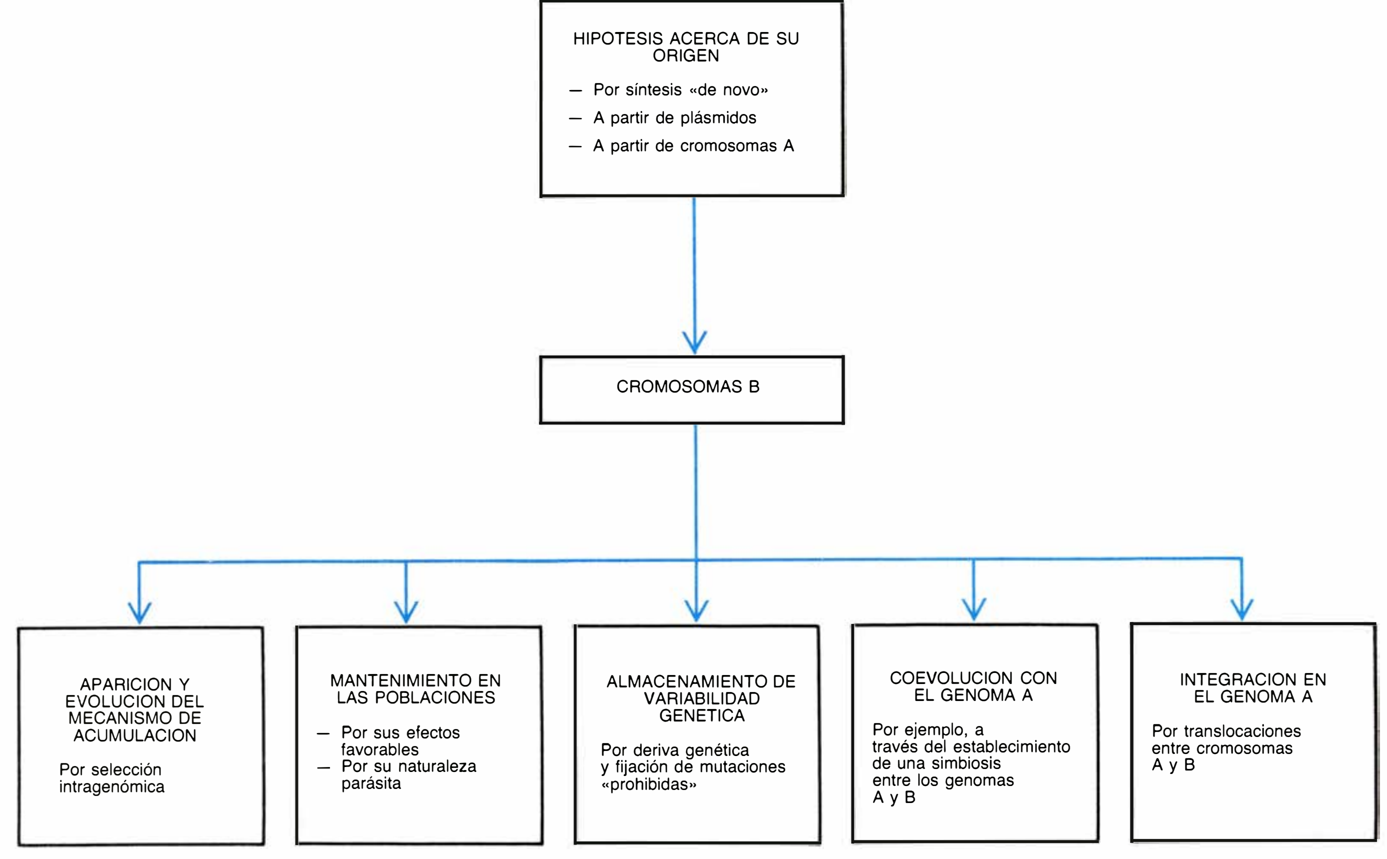
¿Cuál es entonces el significado de los cromosomas egoístas? ¿Intervienen en la evolución del resto del genoma? En un comienzo se les consideró un subproducto de la estabilización cariotípica de las especies: simples restos de reorganizaciones cromosómicas. Sin embargo, su amplia distribución por el reino vegetal y animal y sus características citogenéticas indican que constituyen un mecanismo cromosómico de evolución que la naturaleza ha explotado de modo recurrente. La posibilidad que tienen de escapar a la acción de la selección natural les permite acumular una gran cantidad de variabilidad genética.

Ahora bien, ¿son un punto de no retorno evolutivo o se trata, por contra, de un conjunto de genes que, habiendo evolucionado a espaldas de la selección fenotípica, se integran, llegado el momento, en la dotación *A*? Es pronto aún para responder a esta pregunta; los escasos datos disponibles parecen apoyar, no obstante, el segundo punto de vista. Ya en 1973 Hewitt sugirió que los cromosomas *B* podrían volver a integrarse en el genoma *A*. Más recientemente, J. L. Santos, P. Arana y N. Henriques-Gil, de la Universidad

Complutense de Madrid, han puesto de manifiesto en *Eyprepocnemis plorans* la existencia de translocaciones entre las dotaciones *A* y *B* de este saltamontes. Esto supone que el ADN de los cromosomas *B* puede volver a integrarse en la dotación *A*, lo que podría constituir un verdadero "reciclaje" para dicho ADN. Tal reincorporación podría ser el origen de los segmentos supernumerarios que se encuentran frecuentemente en los cromosomas *A* de muchas especies dotadas de cromosomas *B*.

La verdad es que el polimorfismo para segmentos supernumerarios suele ir acompañado de la presencia de *B*, en la especie en cuestión o en otra afín. Recuérdese a este propósito la sorprendente analogía que muestran los cromosomas *B* con otros elementos genéticos, por ejemplo, con los plásmidos bacterianos o incluso con los retrovirus, capaces, unos y otros, de llevar un doble modo de vida, es decir, existir de forma autónoma o integrados en el cromosoma. La analogía puede llevarse más lejos incluso, ya que los *B*, en virtud de su naturaleza heterocromática, pueden afectar a la expresión de ciertos genes situados sobre el cromosoma en el que se integren, algo que también suele ocurrir tras la integración de plásmidos y retrovirus.

¿Cómo responde el genoma *A* ante la presencia, y la competencia incluso, de los cromosomas egoístas? Una de las respuestas puede conducir al establecimiento de una simbiosis entre los cromosomas *A* y *B*, a través de un proceso de coevolución. Al principio, la relación entre ambos genomas podría compararse con la que existe entre parásito y hospedador. Más tarde, esta situación podría derivar hacia una relación de simbiosis, en la que los cromosomas *B* fueran mejor tolerados por el genoma *A*. Esta tolerancia parece depender, al menos en parte, de genes modificadores presentes en el genoma *A*. La existencia de modificadores que mejoran la viabilidad de las plantas con cromosomas *B* de *Lilium callosum*, fue sugerida en 1961 por M. Kimura, del Instituto Nacional de Genética del Japón, y H. Kayano, de la Universidad de Kyushu. La presencia de esos modificadores posibilitaría que el parasitismo inicial se transformase en simbiosis. En tal situación, el valor adaptativo de los individuos dotados con cromosomas *B* sería mayor que el de los individuos carentes de ellos, lo que resultaría en un predominio de la población portadora.



8. EL ENIGMA DE LOS CROMOSOMAS *B*. Aunque mucho se ha investigado sobre este tipo de material cromosómico tan excepcional, todavía persisten muchos enigmas con respecto a su origen, a la forma en que se mantienen en las poblaciones naturales y, en definitiva, a su papel biológico y evolutivo. Algunas de las hipótesis con respecto a su origen son muy atractivas, como es el caso de la que propone que los *B* se originan por ampliación genómica a partir de plásmidos similares a los de bacterias, pero carecen de apoyo experimental. La hipótesis más aceptada es la que propone que los *B* se originan por duplicación total o parcial de alguno de los cromosomas de la dotación *A* (tal vez partiendo de sistemas polisómicos), y sufren posteriormente un proceso de divergencia que los hace diferenciarse del material cromosómico de partida. Una vez que aparece un mecanismo de acumulación, la acción de la selección intragenómica hace que éste sea cada vez más eficaz. En cuanto a los mecanismos evolutivos que permiten el mantenimiento de los *B* en las poblaciones naturales, existen dos posturas claramente diferenciadas. La primera de ellas, actualmente en retroceso, propone que los *B* se mantienen gracias a sus efectos favorables sobre los individuos que los portan. La segunda postura propone que los cromosomas *B* pueden mantenerse en la naturaleza gracias exclusivamente a sus eficaces mecanismos de acumulación. Bajo este punto de vista, los *B* podrían considerarse "cromosomas parásitos o egoístas", ya que su presencia no redunda en ventaja alguna para el organismo que los alberga. Los *B*, mientras se encuentran en dosis bajas, escapan a la acción de la selección fenotípica, y pueden convertirse en verdaderos "almacenes" de variabilidad genética (ya que pueden tolerar mutaciones que para los cromosomas normales resultarían "prohibidas"). Por otra parte, el genoma *A* se muestra capaz de responder a la presencia de los cromosomas *B*. Tal respuesta podría llevarse a cabo en el marco de un proceso de coevolución entre ambos genomas, que daría lugar al establecimiento de una relación de simbiosis entre uno y otro. La variabilidad acumulada por los *B* podría ser utilizada más tarde por la especie, si el material genético que constituye los *B* vuelve a integrarse en el genoma *A* (a través de translocaciones, por ejemplo).

Más recientemente, M. J. Puertas, F. Romera y A. de la Peña, de la Universidad Complutense de Madrid, han sometido a comprobación la hipótesis de Kimura introduciendo los cromosomas *B* del centeno (*Secale cereale*) en la especie relacionada *S. vavilovii*, carente de cromosomas *B*. Puesto que los efectos de *B* son similares en ambas especies, no parece probable que se haya establecido una coadaptación entre los genomas *A* y *B* del centeno.

Otra respuesta del genoma *A* frente a la competencia del *B* sería la aparición de modificadores que reducen la tasa de acumulación de los cromosomas egoístas. De esos modificadores se han ocupado Carlson, Hewitt, Shaw, Nur y Brett; podrían conducir a una eliminación progresiva de los *B*. Conviene tener en cuenta que, si ambos tipos de genes modificadores apareciesen en una población, podrían dar lugar a un incremento del número cromosómico básico de la especie, debido, por un lado, a la estabilización que provocan sobre el comportamiento de los cromosomas *B* y, por otro, a la reducción de sus efectos desfavorables.

En conclusión, los cromosomas *B*, durante mucho tiempo considerados accesorios, desempeñarían un papel más importante del que se creía, al constituir una vía alternativa para la evolución del material cromosómico. Normalmente, en los organismos superiores, éste se transmite siguiendo las leyes de Mendel, y cambia a lo largo de generaciones por la acción combinada de diversos factores evolutivos, entre los que destaca la selección natural. Sin embargo, al igual que los elementos genéticos móviles, los cromosomas *B* han adquirido mecanismos que les permiten escapar al control mendeliano de transmisión hereditaria, siendo capaces de evolucionar, por lo menos hasta cierto punto, a espaldas de la selección natural y sí a instancias de la selección intragenómica, que velaría sólo por la supervivencia y propagación de tales cromosomas. Eso convierte a los *B* en cromosomas capaces de evolucionar, hasta cierto punto al menos, de manera autónoma, con independencia de sus efectos fenotípicos. En su proceso de diferenciación, acumularían mutaciones que, en los *A*, no permitiría la selección natural, constituyendo de ese modo un depósito de variabilidad genética que podría ser reciclado, andando el tiempo, por la especie, al volver a integrarse en la dotación cromosómica *A*, participando así en la evolución global del genoma.

Juegos de ordenador

Las escalas verbales y una Torre de Babel llevan a alturas computacionales casi imposibles de asaltar

A. K. Dewdney

Nadie sabe cómo ni por qué se extinguió la civilización marciana, pero una cueva situada al pie del monte Olimpo conserva un triste recordatorio de esa antigua y maravillosa cultura. En lo profundo de la cueva, amortajada en un tejido de composición desconocida, se encuentra una lápida que nos recuerda la piedra de la Rosetta. Al retirar la envoltura se nos revela lo que parece ser una especie de diccionario: a la izquierda, una columna de palabras, cuidadosamente emparejadas con las de una lista situada a la derecha. Se distinguen al pie de la lápida dos inscripciones, dos frases relacionadas de forma muy curiosa. La primera puede transformarse en la segunda por repetida sustitución de palabras del diccionario: los términos de la frase que figuran en la relación de la izquierda pueden remplazarse por los correspondientes de la derecha.

Losmarcianosnoseparanlaspalabrasalescribir. En efecto, la fluidez y expresividad del marciano clásico hace inútiles los espacios. Ocurre con frecuencia que sean muchas las formas en que puede descomponerse en palabras una frase marciana. No obstante, por lo general sólo unas pocas de esas descomposiciones tienen sentido en un contexto dado. Ilustraremos el proceso de descomposición valiéndonos de la primera frase de este párrafo. Si en la columna izquierda del diccionario figurase *ranlaspalabras* y la correspondiente palabra de la columna derecha fuera *recenaterrestres*, la primera de éstas podría remplazarse por la segunda, y se obtendría una nueva frase válida, a saber, Losmarcianosnoseparecenaterrestres.

1. *Diccionario de la sabiduría marciana*

Los sabios del antiguo Marte mantenían que toda la información digna de aprenderse podía obtenerse a partir de una única frase válida, a base de sustituir en ella las palabras atendiendo al diccionario de la sabiduría, del cual sólo ha sobrevivido el fragmento que yace en la cueva. La frase fundamental es la primera de las dos inscritas en el pie de la lápida del monte Olimpo, que se reproduce en esta página. En general, el ordenador no logrará averiguar si una frase dada puede deducirse de la fundamental. Dicho de otro modo, no existe posibilidad de redactar un programa de ordenador (por grande que sea el programa y por rápida que pueda ser la máquina) capaz de decidir correctamente, a partir de un diccionario y de dos palabras (o frases), si la primera palabra puede traducirse en la segunda. Más adelante explicaré la razón. Entretanto, ¿podrán los lectores transformar la frase fundamental en la mostrada debajo de ella? (Esa transformación en particular sí es realizable.)

El problema de traducción marciana es miembro de una familia entera de problemas que piden la transformación de palabras, frases e incluso párrafos enteros en otras palabras, frases o párrafos. El desarrollo inicial de ese tipo de problemas se debe, al menos en parte, al Reverendo Charles Dodgson, conocido también por Lewis Carroll. Entre los muchos pasatiempos simbólicos y matemáticos que Carroll inventó durante sus paseos por Oxford se cuenta una transformación llamada "escalera de palabras", que, por abreviar, aquí llamaremos "escala". En una escala se parte de dos palabras, del idioma que uno prefiera. La primera es la palabra "origen" y, la segunda, la "destino". ¿Podremos transformar la palabra origen en la destino cambiando una sola letra por vez?

Así planteado, si las palabras tienen el mismo número de letras, el problema parece trivial. Pero, ¿podremos garantizar que todas las series de símbolos intermedias sean palabras con significado? Aunque eso ya es otro cantar, los académicos del juego de palabras no tendrán dificultad en corearlo. En efecto, podemos ilustrar el proceso con las palabras *cantar* y *corear*. El primer paso convierte cantar en *contar*. Un segundo peldaño nos lleva a *cortar*, y finalmente, a corear. Se diría que tal método alquimístico permitirá tranmutar una en otra dos palabras cualesquiera del mismo número de letras. ¿Será cierto?

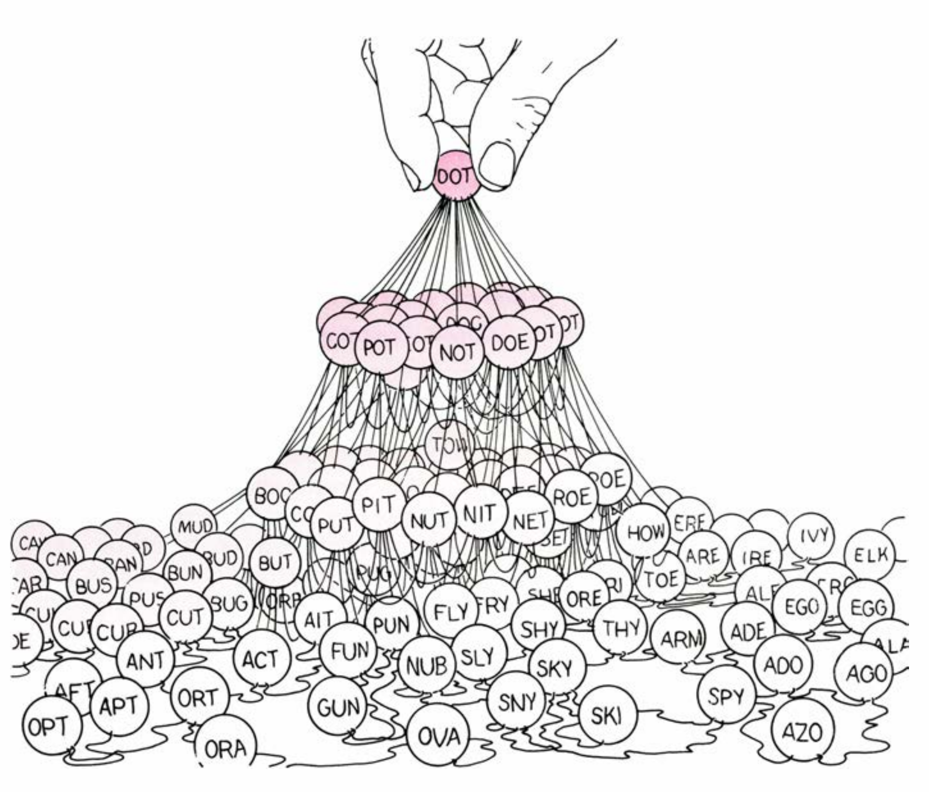
Para responder a esta pregunta en el caso general es necesario construir una retículo de transformaciones. Enemigo que soy de la terminología rimbombante, lo llamaré red verbal. La red correspondiente a un idioma entero resultaría monstruosamente grande; cada palabra habría de ocupar un único nudo de la red. Para cumplir las reglas de formación de escalas verbales, dos nudos formarían parte de una misma malla de la red y se encontrarían unidos por una línea si y sólo si sus correspondientes palabras difirieran en una letra. Para hallar todas las palabras en que puede transformarse *cantar*, recorreríamos la red a partir de ese término y añadiríamos a una lista todas las palabras que encontrásemos por el camino. La exploración completa de todos los caminos equivaldría a tirar de la red por el nudo *cantar* y arrastrar en pos todos los nudos conectados con él. El conjunto seguramente semejaría una

red de pescador mal rememendada. Evidentemente, no bastaría *cantar* para arrastrar en pos de sí cualquier palabra. Por ejemplo, todos los términos que tienen más o menos de seis letras quedarían atrás.

Pero, ¿se arrastrarían todas las de seis? Es decir, ¿podría conectarse por una escala *cantar* con cualquier otra palabra española de seis letras? Admito que ignoro la respuesta; mas, a juzgar por la respuesta que han dado los lectores a artículos pasados, apostaría que alguno de ellos la encontrará. Los requisitos: disponer de un diccionario en formato legible por ordenador y crear un programa que lo explore en busca de palabras conectadas entre sí. Cada vez que se añade una palabra a la lista de las conectadas con *cantar*, el programa la borra del diccionario que conserva en la memoria y repasa de nuevo la lista, comparando las palabras que figuran en ella con todas las que encuentra en el cada vez más reducido diccionario. En cuanto una palabra del diccionario difiere en una sola letra de algún término de la lista, se incluye en ésta y el proceso vuelve a comenzar. Por supuesto, cada diccionario producirá un resultado distinto, ¿verdad? Quizás sí. Por otra parte, dos diccionarios razonablemente completos ofrecerían el mismo producto; es decir, las redes serían tan tupidas que sus topologías resultarían prácticamente una misma.

La cuestión de si están conectadas las palabras de *n* letras casi puede responderse a mano para valores pequeños de *n*. Evidentemente, todas las palabras de una letra están conectadas en una sola red. En el caso de las palabras inglesas de dos letras, el problema puede decidirse aquí y ahora. Según mi diccionario, el Scrabble, las palabras inglesas de dos letras son *aa, ad, ae, ah, ai, am, an, ar, as, at, aw, ax, ay, ba, be, bi, bo, by, da, de, do, ef, eh, el, em, en, er, es, et, ex, fa, go, ha, he, hi, ho, id, if, in, is, it, jo, ka, la, li, lo, ma, me, mi, mu, my, na, no, nu, od, oe, of, oh, om, on, op, or, os, ow, ox, oy, pa, pe, pi, re, si, so, ta, ti, to, um, up, us, ut, we, wo, xi, xu, ya* y *ye*.

Con algo de esfuerzo se comprueba que todas las palabras de la red están conectadas. En primer lugar, todas las de dos letras que comiencen por la misma letra están mutuamente conectadas. Ello nos permite agrupar todas las palabras que empiecen por la misma letra. Queda únicamente por observar que el grupo correspondiente a la *a* está conectado con los otros cuatro grupos vocales, que el grupo de la *b* está conectado con cada uno de los otros 16 grupos definidos por consonantes y, finalmente, que el grupo de la *a* y el grupo de la *b* están conectados entre sí.



2. Malla de palabras de tres letras

No faltarán quienes, armados solamente con los tanteos afirmativos correspondientes al orden mínimo, procedan osadamente a conjeturar que todas las palabras inglesas de *n* letras están conectadas. La proposición es típica del apasionamiento que suscitan los juegos de palabras abstractos. Los lectores provistos de ordenador podrían tratar de ensayar la proposición para otros valores bajos de *n*, por ejemplo, $n = 3$ [*véase la figura 2*]. Quienes no dispongan de ordenador adecuado tendrán que conformarse con transformar *odio* en *amor* o, mejor todavía, *maldad* en *virtud*, con lo que obtendrán en el proceso una valiosa comprensión de nociones morales y logológicas.

El juego de escalas verbales constituye un ejemplo sencillo de los llamados sistemas de transformación textual. Los dos ingredientes fundamentales de tales sistemas son un conjunto de textos a transformar y una regla de transformación. Los textos podrían ser palabras, frases o párrafos, que en realidad no son más que ristras de caracteres, sean cuales fueren los textos elegidos. La regla de transformación consiste en un procedimiento que remplaza parte de una ristra dada por otra ristra. Habitualmente, para aplicar el procedimiento se consulta un diccionario.

Así, por ejemplo, en el juego que hemos llamado "escalas verbales", el conjunto de ristras consiste en la totalidad de los vocablos (españoles o, si se quiere, de otro idioma) que figuren en algún diccionario. El procedimiento toma cualquier palabra que se le presente y genera otra que se encuentre en el diccionario, y que difiera de la primera solamente en una letra. En este caso, el diccionario es una simple lista de vocablos.

Prácticamente todos los diccionarios publicados presentan una lista lexicográficamente ordenada de palabras —las "voces"— "definidas" mediante otras palabras. Se halla implícito en ese proceder un tipo de transformación más complejo que la escala verbal. Imaginemos, por ejemplo, que tomamos una única palabra española y formamos una lista con todas las palabras utilizadas en su definición. Consultamos seguidamente los significados de éstas, ampliamos la lista precedente y repetimos el proceso. Dado que el español tiene un número finito de palabras (no puedo asegurar lo mismo de otros idiomas) este procedimiento adquiere pronto un carácter cíclico, por así decirlo. Ciertas palabras comienzan a repetirse. Están definidas, al menos en parte, por alusión a sí mismas. Podríamos llamarlas "palabras primordiales", y no deberíamos proclamarlas a

asustado – temeroso – receloso – expectante – esperanzado – confiado – **tranquilo**
constante – regular – periódico–habitual – frecuente – ocasional– **inconstante**
maquillarse – acicalarse – asearse – limpiarse – lavarse – **desmaquillarse**
perfecto – completo – terminado –retocado– deficiente – **imperfecto**
potente – dinámico – animado – excitado – nervioso – fatigado – agotado – **impotente**
racional – inteligente – ingenioso – ocurrente – gracioso – disparatado – **irracional**
sociable – amistoso – pacífico – inofensivo – timorato – retraído – **insociable**
verdadero– convincente – verosímil – plausible – probable – incierto – **falso**

3. Torre de Babel de Ron Hardin

gritos, sino musitarlas silenciosa y reverentemente, pues tal vez constituyan los indefinibles cimientos conceptuales del idioma.

En ese proyecto, o algo muy semejante, se empeñó Robert Amsler, de Bell Communications Research. Amsler se valió de un diccionario modificado de forma tal que la definición de cada palabra se había reducido a un conjunto de palabras taxonómicas, que servían para identificar las amplias clases de objetos a las que pertenecía la palabra. Las palabras taxonómicas venían complementadas con palabras diferenciadoras: términos que la distinguían de otros miembros de su mismo género taxonómico. Valiéndose de un programa similar al descrito anteriormente, Amsler examinó exhaustivamente su diccionario especial y descubrió básicamente lo que los lingüistas habían predicho: palabras primitivas, todas las cuales se utilizaban en las definiciones últimas de otras palabras primitivas. Entre esos ejemplos se contaban *food* (comida), *person* (persona), *thing* (cosa), *instrument* (instrumento) y *group* (grupo). Las primitivas ocupaban las ramas últimas de lo que ha sido llamado una jerarquía enmarañada, algo así como un bosque en el que las ramas de diferentes árboles hubieran crecido juntas. Las que se encuentran "hacia lo alto" en la dirección de generalidad creciente.

La idea fundamental de Amsler es que los diccionarios tienen más estructura y revelan más sobre el lenguaje de lo que ordinariamente se supone. Sorprendente sería que un esquema tan simple como la clasificación por género y diferencia no produjera algunas anomalías. Una barbacoa, por ejemplo, resultó ser "un animal asado sobre un fuego al aire libre". Consiguientemente, la barbacoa acabó viéndose incluida en una lista que comenzaba por *aardvark* (cerdo hormiguero) y concluía por *zebra*.

La investigación desarrollada por Amsler tiene aplicaciones en sistemas de recuperación de bases de datos, cuando el usuario pide ejemplos particulares de objetos de una clase general. En el presente, Amsler se está dedicando a reconstruir su jerarquía enmarañada en el *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms*.

Ron Hardin, investigador científico de los Laboratorios AT&T Bell de Murray Hill, New Jersey, ha explorado un tipo semejante de transformaciones. Hardin ha ideado progresivamente varios juegos de transformación textual, interesantes y amenos. Su último empeño aborda el *The New Collins Thesaurus*. Por regla general, quienes utilizan un diccionario ideológico buscan sinónimos de una palabra, o una clase conceptual de palabras, que tienen en mente. Vale imaginar que cada palabra habita en una pequeña nube de términos que significan prácticamente lo mismo. Empero, la distancia entre esas nubes es escasa; frecuentemente algunas se superponen y entremezclan. En consecuencia, aunque ciertos pares de palabras no sean sinónimos mutuos, pueden tener sinónimos comunes. Y en ello reside la fuente de muchos malentendidos e injurias. Fijémonos en las siguientes cadenas, desenterradas por Hardin. Cada palabra figura en la nube de sinónimos de su predecesora:

aceptable → pasable → ordinario → inferior → podrido → inaceptable

seguro → constante → obstinado → terco → caprichoso → impredecible → inseguro

Valiéndose de ordenador, Hardin ha generado millares de cadenas similares. En cada cadena, una palabra se convierte gradualmente en su antónima. La longitud de la gran mayoría de las cadenas generadas por Hardin no supera la de estos ejemplos. El ejercicio nos recuerda que los lenguajes humanos son fluidos, que el significado de las palabras depende intensamente del contexto, que cada palabra tiene cierta ambigüedad que constituye a la vez una bendición y un maleficio. Imaginemos el caso de un abogado interrogando a un testigo acerca del carácter de un acusado:

"Ha manifestado usted en su testimonio que Watson es persona en la que se puede confiar. Diría usted que es persona 'tenaz'?"

"Sin duda."

"En realidad, ¿no diría usted que el acusado ha manifestado de cuando en cuando obstinación en su tenacidad?"

"Bueno. . . supongo que sí."

"Y a veces, sin duda, su obstinación venía a ser una especie de terquedad caprichosa, ¿no es así?"

"No estoy seguro."

"¿Que no está seguro? Vamos, vamos, Dr. Finch, ser obstinado y ser caprichoso vienen a ser prácticamente lo mismo."

"Supongo que sí".

"Una persona caprichosa es una persona impredecible, en breve, una persona en quien no se puede confiar. ¡Ha contradicho usted su testimonio anterior!"

Se dan en la figura 3 algunas muestras más de series de inversión de significado obtenidas por Hardin. Sin embargo, la explotación del Thesaurus de Collins por parte de Hardin no es tan sencilla e inmediata como mis palabras puedan haber dado a entender. Ese diccionario está organizado por epígrafes. Cuando se desea encontrar una palabra nueva para encajarla en un contexto dado, se busca en el epígrafe o encabezamiento de significado más próximo al deseado. Bajo él figura una lista de palabras emparentadas con la del encabezamiento, organizadas por su significado. Por ejemplo, bajo la palabra juego se hallan palabras y frases afines a colección y a soltura y movilidad de las articulaciones. El principal problema de Hardin radicó en conectar las distintas acepciones ofrecidas en cada epígrafe de modo lógico y coherente. Según afirma el propio Hardin, "Si se supone que no debe desaparecer ninguna de las matizaciones que se efectúan al distinguir los significados cuando se propagadan . . . no hay forma de conectar coherentemente el diccionario".

En consecuencia, Hardin ideó un algoritmo para examinar sistemáticamente todos los pares de epígrafes afines y calcular la intensidad de la conexión entre los distintos sentidos en que cada uno de ellos puede tomarse. Los signficados que mostraban máximo

grado de conexión entraron seguidamente a formar parte de una especie de red verbal tejida por el algoritmo. De esta forma, las diferencias de matiz propendían a quedar bien definidas, si bien, en ocasiones, se difuminaron. Una vez completada la red, se hizo actuar un segundo algoritmo, que trazaba el camino más corto entre dos significados cualesquiera. Le resultó entonces fácil a Hardin especificar diversos pares de palabras para crear su propia Torre de Babel, en recuerdo del edificio bíblico cuya construcción quedó desbaratada por la confusión de lenguas. La torre de Hardin es un tomito de especial atractivo para lingüistas y abogados.

Veamos cómo transformó Hardin el poema que comieza " 'Twas the night before Christmas" ("Erase la Nochebuena . . .") en otro "poema" que comienza "Tweeze denied beef worker isthmus", por ejemplo. Hardin comenzó por descomponer todas las palabras del original en una cadena de símbolos fonémicos, esto es, sonidos básicos agrupados por semejanza. Tras realizar la misma tarea con un diccionario normal, hizo que un ordenador reagrupase los fonemas en palabras nuevas, prescindiendo, cuando fuera necesario, de la separación entre las palabras del texto original. Para concluir la chifadura, Hardin y algunos colegas de los Laboratorios Bell tuvieron que limar a mano algunas asperezas de la versión computarizada. El poema resultante deja al celebrante de la Navidad con una extraña noción de cuál pudiera ser el tema del original [*véase la figura 4*].

Tenemos ahora que volver al problema de la traducción marciana. Dado un diccionario de sustituciones permisibles y dos palabras (por largas que sean), ¿por qué es imposible que un ordenador decida, en general, si la segunda palabra puede obtenerse de la primera mediante una serie de sustituciones tomadas del diccionario? La cuestión se ha denominado "problema verbal de Thue", en honor del matemático noruego Axel Thue.

Son muchos los ajenos a la informática (e incluso los hay no tan ajenos) que no alcanzan a darse cuenta de que existen cosas que los ordenadores, pura y simplemente, no pueden hacer. Uno de los primeros en sugerir que los ordenadores tienen limitaciones intrínsecas fue el inglés Alan M. Turing, uno de los padres fundadores de las ciencias de cómputo. Turing imaginó un tipo muy sencillo de ordenador abstracto que se ha dado en bautizar (no por él) máquina de Turing. El artilugio conceptual es capaz, en principio, de efectuar cualquier proceso de cómputo que un ordenador existente hoy, o concebible en el futuro, pueda realizar. Turing demostró que es imposible que una máquina de su nombre pueda determinar en todos los casos si, dada otra máquina de Turing y su entrada, ésta segunda llegará a detenerse. En términos más concretos, es imposible escribir un programa que, tomando para sí como datos un segundo programa y los datos de entrada de éste, pueda decidir si el segundo programa llegará alguna vez a cesar en la manipulación de sus datos.

El teorema de Turing ha encontrado una aplicación práctica cuando menos. En cierta ocasión, un experto en sistemas informáticos de una institución educativa llegó a la conclusión de que un gran ordenador estaba dedicando demasiado tiempo a ejecutar los programas creados por alumnos de primer curso. Una de las principales causas de los retrasos se debía, al parecer, a que muchos de los programas contenían bucles infinitos no intencionados. Si fuera posible examinar los programas y depurarlos antes de su ejecución mediante un programa de detección de bucles infinitos, podría economizarse mucho tiempo. Lástima, un programa de detección de procesos infinitos es imposible, se apresuró a informar al experto un estudiante de Turing.

Sabiendo ya que el llamado problema de la detención es irresoluble, resulta relativamente fácil demostrar al profano que también el de traducción marciana es irresoluble. La demostración consiste en probar que el problema de detención de la máquina de Turing puede convertirse en el problema de la traducción marciana.

La conversión resulta conceptualmente sencilla. Se codifica en el ordenador una larga ristra de símbolos. Esencialmente, lo que la ristra describe es el contenido inicial de la memoria del ordenador y de sus registros de trabajo. Se construye seguidamente una segunda ristra. Indica que el ordenador se encuentra en un estado de detención; sea cual fuere el cómputo que tuviera que realizarse, ya está terminado. El programa que debe someterse a prueba para ver si se detiene se traduce a un sistema de reglas destinadas a convertir, mediante sustituciones, la primera ristra en la segunda. Cada paso intermedio simboliza entonces un paso del funcionamiento del ordenador a medida que éste procede (así lo esperamos) a efectuar el procesamiento de los datos que le han sido presentados. Para llevar de estado en estado al ordenador virtual, las reglas se valen de sustituciones, de acuerdo con el programa.

Si, por ejemplo, interesa almacenar en cierta posición de la memoria el contenido actual de un registro, las reglas sustituyen el nuevo contenido de esa posición de la memoria en la porción de ristra que representa en ese momento la posición de memoria en cuestión. El procedimiento de transformación logrará obtener la segunda ristra a partir de la primera si, y solamente si, el ordenador en cuestión acaba finalizando su procesamiento de los datos que le han sido proporcionados. Dado que, según el teorema de Turing, el ordenador no se detendrá jamás, la transformación pedida no puede realizarse.

Prescindiendo incluso de tan refinado argumento, la irresolubilidad del problema de traducción marciana viene fuertemente sugerida por la observación siguiente: si la palabra origen pue-

TWEEZE DENIED BEEF WORKER ISTHMUS

Tweeze denied beef worker isthmus, winnow Trudy how's,
Knot agreed juries during, gnaw Tiffany moss.
This talking swear unbided Gemini wit cairn
Hint opus scenic (alas!) sinewy dare.
Unjelled runner nozzle tools smuggling deer butts
Well fissions unshoe kerplunks thence endear huts.
Anemometer cur chiffon dyeing mayhap,
Adjust subtle warp reins fairy loin winger snap.
Winnow taunted launderer roast sachet glitter
Ice brine bromide bet deucey woodwinds schemata.

4. Los primeros versos de "Tweeze denied beef worker isthmus"

de transformarse en la palabra destino, un programa que ensayara todas las sustituciones concebibles acabaría por dar con las correctas. Pero si la transformación fuera imposible, ¿cómo llegaríamos a saberlo? ¿Hasta cuándo tendríamos que esperar? Los lectores que se vean incapaces de resolver nuestro caso particular de traducción marciana tendrán que esperar hasta el mes que viene.

Comenté en julio pasado de qué formas se utilizan los ordenadores en el mercado de valores. Mi exposición fue avanzando en tres etapas, desde la periferia hasta el corazón del mercado. Primero, los inversores individuales que tengan acceso a un ordenador pueden comprar cualquiera de los centenares de programas dedicados al análisis técnico o fundamental de los valores. Ya más cerca de la Bolsa, las grandes instituciones de inversión y las agencias se valen de ordenadores para calcular la venta o compra de opciones futuras de valores (la opción de comprar o vender un valor en alguna fecha futura a un precio establecido en el presente). Más cerca todavía, tenemos la posibilidad de remplazar en todo o en parte al especialista por un programa de ordenador. El especialista es la persona que tiene a su cargo todas las operaciones de cambio de un valor determinado en una bolsa determinada. ¿Podrá desempeñar el papel del especialista un programa que gestione todas las operaciones de compra y venta, reajustando adecuadamente los precios a lo largo del proceso? Sometí la cuestión al dictamen de los "expertos" lectores de esta sección, y no quedé defraudado.

Aaron C. Brown es asesor financiero en Nueva York; hace algunos años presentó una tesis doctoral sobre análisis técnico en el departamento de finanzas de la Universidad de Chicago. Brown nos previene de los riesgos del análisis técnico. Para el gusto de Brown, mis propias reservas al respecto fueron demasiado tímidas. "Existe una abrumadora experiencia de que [tales análisis] no funcionan en lo tocante a generar beneficios importantes. Y lo que es más importante, son peligrosos." Especialmente peligrosa, escribe Brown, es la estrategia de comprar valores cuando su precio se desploma, en previsión de recuperaciones a corto. Tal estrategia es prima hermana de la consistente en duplicar la apuesta tras cada pérdida, nos advierte. El inversor podría encontrarse comprando siempre valores en descenso durante un largo declive, con la esperanza puesta en el cambio de tendencia.

Charles J. Higgins, del Departamento de Finanzas y Sistemas Informáticos de la Universidad Loyola Marymount, de Los Angeles, ha examinado un método técnico concreto llamado técnica de la gráfica de tendencia, similar a la del canal de transacción que expuse en julio. En opinión de Higgins, los corretajes y costos de transacción son decisivos. En los datos sobre precios estudiados por Higgins, la mayoría de los valores no produjeron rendimientos anormales, significativamente superiores al promedio del mercado. "Sin embargo, muchos valores sí produjeron rendimientos anormalmente superiores . . . cuando el costo de las transacciones era muy pequeño o nulo." Según Higgins, ello indica la posibilidad de que especialistas, operadores del parquet y otros miembros de la bolsa (que no pagan corretajes ni otros costos, o pagan muy poco) logren rendimientos importantes.

Durante las décadas de 1960 y 1970, el físico M. F. M. Osborne llevó a cabo un estudio de los métodos de actuación en bolsa. Ha impartido algunos cursos sobre finanzas bursátiles en la Escuela Superior de Administración de Empresas de la Universidad de California en Berkeley. Según Osborne, que actualmente reside en Hillcrest Heights, Maryland, hace algún tiempo que vienen aplicándose algoritmos de transacción, si no como programas de ordenador, sí al menos en tanto que sistemas de reglas aplicadas por el bolsista humano. Osborne, que ha estudiado una serie de algoritmos progresivamente más complicados, ha enviado dos volúmenes de notas sobre la cuestión, y señala que las cosas se le ponen difíciles al especialista que situado en el centro del mercado si trata de lograr beneficios indebidos.

Comienza diciendo una vieja tonada, "¿Qué es la vida?" Del 21 al 25 de septiembre inmediatamente pasado, los participantes en el simposio sobre Vida Artificial celebrado en Los Alamos, New Mexico, habrán de encontrar muchas respuestas, expresadas en sistemas abstractos, diversas simulaciones informáticas, equipos y programas y, posiblemente, sistemas químicos, que se han dado en llamar "wetware", soporte húmedo. Los interesados en el tema de la vida artificial pueden ponerse en contacto con Chistopher Langton, Center for Nonlinear Studies, MS B258, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos N.M. 87545, Estados Unidos.

Taller y laboratorio

Música y vapores de amoníaco excitan los colores de las películas de jabón

Jearl Walker

El reluciente ramillete de colores que exhiben las películas de jabón se debe a la interferencia óptica de las ondas luminosas que se reflejan en la superficie delantera con las que se reflejan en la superficie posterior. Este fenómeno da pie a todo un conjunto de experiencias.

Supongamos que se ilumina la película con luz monocromática: de un solo color, que posee una longitud de onda única. Si la interferencia es constructiva (los dos trenes de ondas procedentes de una zona determinada de la película están sincronizados), esa zona de la película aparece brillantemente coloreada. Si la interferencia es destructiva (las ondas están desincronizadas), esa zona de la película aparece oscura.

Cuando la película se baña de luz blanca, que se compone de múltiples longitudes de onda y, por tanto, de distintos colores, se crea una figura variopinta de manchas y bandas cromáticas. Allá donde se ve un cierto color la correspondiente longitud de onda interfiere constructivamente. Las ondas de otras longitudes se interfieren destructivamente, por lo que esos colores aparecen pálidos o no se ven. El espesor de cada zona de la película determina qué longitudes de onda interfieren en ella constructivamente. Y así, como el espesor suele ser variable, la película presenta toda una colección de colores.

Si la película se mantiene vertical, el líquido que la forma se desplaza lentamente hacia abajo, principalmente a causa de la gravedad; ello provoca que el espesor varíe desde la parte superior a la inferior. A una altura dada, el espesor es aproximadamente constante en sentido horizontal. Por ello, se ven bandas de color horizontales, cada una relacionada con determinado espesor de la película. Si la perturbamos haciendo que el espesor varíe, los colores fluctúan, acaso sin orden ni concierto.

Para poner de manifiesto esas fluctuaciones, Andreas Kay, de Colonia, ha ideado un procedimiento para proyectar los colores de una película de jabón, posibilitando que ésta actúe a modo de espejo. Para preparar la montura de la película, Kay recorta el interior de la tapa de una lata de té Sir Winston (puede servir una tapa cualquiera, pero la forma de las del té Sir Winston resulta más favorable). Cuando la película se instala verticalmente, el líquido que cae poco a poco se reúne en una estría que rodea el borde de la tapa y luego sale de la montura. Si ésta carece de estría, el líquido escurrido se recoge al pie de la película y la distorsiona.

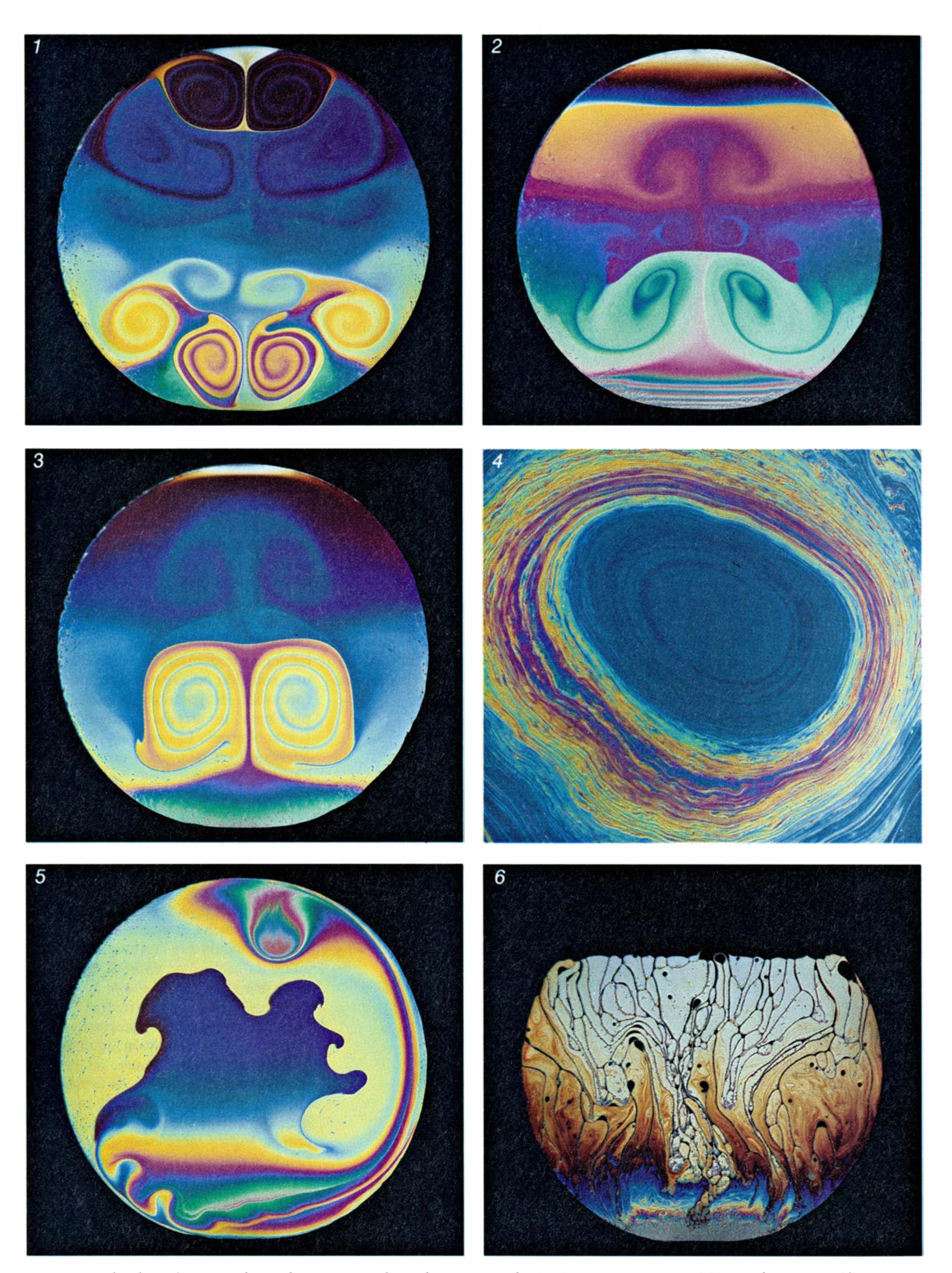
En el montaje de Kay, la película, convertida en espejo cóncavo, refleja la luz sobre una pantalla en la que pueden examinarse los colores de interferencia. Sumerge la tapa en una solución jabonosa, la instala sobre la lata y coloca ésta verticalmente dentro de un haz de luz blanca. Tras humedecer una paja con la solución jabonosa, traspasa la película con la paja, para aspirar un poco de aire del interior de la lata. Al reducirse así la presión del aire interior, la presión del exterior empuja la película hacia adentro, haciéndola cóncava. La curvatura consiguiente determina la distancia focal de la película en cuanto espejo cóncavo. Extrayendo más aire, la película se curva más y el foco se acorta.

La película refleja sólo una pequeña parte de la luz que la ilumina: un tres por ciento aproximado de la que llega a las superficies anterior y posterior. El resto de la luz penetra en la lata y, a menos que se impida su reflexión, enmascarará los débiles colores de interferencia que llegan a la pantalla. Para reducir el deslumbramiento, Kay pinta de negro mate el interior de la lata. Según afirma, el deslumbramiento puede eliminarse dotando además el fondo de la lata de una pared negra inclinada que haga de cepo para la luz. Lo que ocurre es que, cuando la luz se refleja en la pared, viaja más hacia el interior de la lata y se refleja aún varias veces, absorbiéndose parcialmente en cada punto de reflexión.

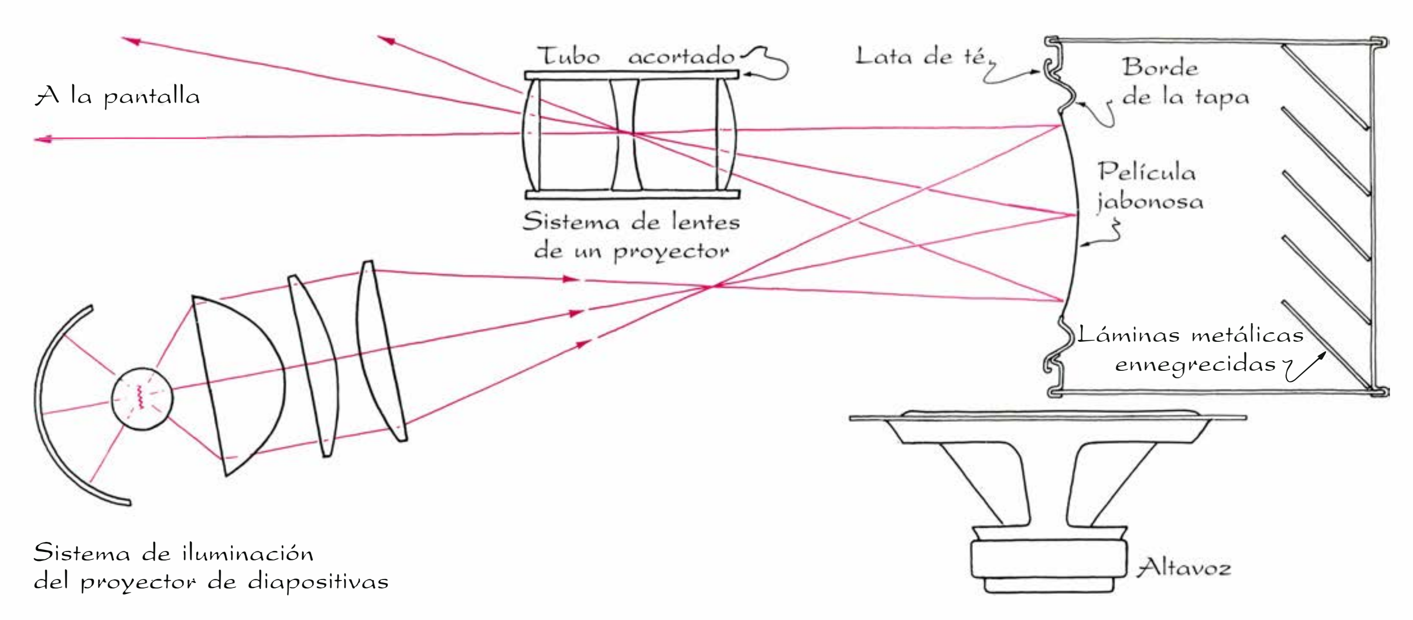
Kay ilumina la película con un proyector de diapositivas intenso, ajustado a foco largo y alineado de modo que la luz reflejada en la película atraviese un sistema de lentes. Procura que la instalación y la pantalla faciliten la máxima claridad en la imagen que se ve en la pantalla. Además, establece la curvatura precisa de la película valiéndose de una jeringuilla que se ajusta ceñidamente a un orificio practicado en la lata. A medida que la pintura absorbe luz, el aire contenido en la lata se caldea y la presión del aire va aumentando, con lo que disminuye la curvatura de la película. Kay extrae luego algo de aire tirando del émbolo y restablece así la curvatura.

Kay ha comprobado que, para generar una imagen clara, debe hacer que la luz reflejada atraviese un sistema de lentes (un objetivo tomado de otro proyector de diapositivas). Este sistema, con una distancia focal de 150 milímetros, se coloca en el foco de la película, de modo que casi toda la luz reflejada por ésta lo atraviesa. El tubo de plástico en el que están montadas las lentes sobresale bastante de las mismas para que pueda introducirse en su proyector. A menos que se elimine esa porción de tubo saliente, obstaculizará parte de la luz procedente de la película. Kay la corta casi a ras de lente.

Para animar los colores en la pantalla, Kay emite música fuerte por un altavoz de bajos colocado junto a la película. Las fluctuaciones de la presión del aire deforman entonces la película y varían la dirección en que se refleja la luz. Esas fluctuaciones afectan también al espesor de la película y cambian los colores que crea la interferencia constructiva de las ondas reflejadas. Así los colores danzan en la pantalla, más o menos acompasadamente con la



Películas jabonosas de Andreas Kay, coloreadas con sonido (1-4) y con amoníaco (5); "caída crítica" (6)



Diseño de Kay para proyectar la imagen de una película jabonosa

música. Kay ha descubierto que el intenso ritmo de la música rock produce un espectáculo mejor que el sonido más lento y menos percusivo de otras músicas.

En ciertas bandas de frecuencia, la película comienza a resonar con el sonido. Partes de la película vibran entonces vigorosamente. Este movimiento crea bellas figuras de remolinos y líneas simétricas en la película y en la imagen de ésta en la pantalla. Cuando la película se expone a ultrasonidos intensos, las imágenes de la pantalla enloquecen. De la película se desprenden unas gotículas; parte de la actividad en la misma se debe a chorros de aire que la atraviesan, forzados por las pulsaciones del altavoz.

La solución jabonosa empleada por Kay consta de 1,4 gramos de trietanolamina, 100 gramos de glicerina (que se vende diluida al 85 por ciento) y dos gramos de ácido oleico. Tras mezclar estos productos, guarda la solución en una botella estanca, que mantiene a oscuras para que el aire no oxide el ácido oleico. Antes de preparar una película, deja reposar la solución durante 24 horas. En ese tiempo debe presentarse traslúcida. Si no es así, contiene probablemente demasiado ácido oleico, y una solución en ese estado provoca la formación de gotas en la película. El problema se arregla añadiendo más trietanolamina. Las películas de Kay se adelgazan en minutos y duran alrededor de una hora.

Kay dispone de otros procedimientos, amén de la música rock, para crear un baile de colores en la pantalla. Un soplo de amoníaco los lleva al frenesí. Ello se debe a que esta sustancia aumenta la tensión superficial de la película allí donde se absorbe. Cuando la zona que recibe el amoníaco tira hacia sí de la película que la circunda, su peso aumenta hasta que, al final, se hincha tanto que cae película abajo. En la pantalla, esa caída parece arrastrar consigo unos colores que se desmoronan.

Cambiando la solución líquida a 15 gramos de trietanolamina, 60 gramos de glicerina y 25 gramos de ácido oleico, Kay pone de manifiesto un fenómeno de adelgazamiento llamado caída crítica. Varios minutos después de instalada la película, ésta comienza a adelgazarse de forma muy rápida por la parte de arriba. Se hace pronto tan fina que la luz reflejada en la superficie delantera se halla siempre en asincronía con la reflejada en la superficie posterior. La película aparece, pues, negra.

Generador de pompas de jabón de Jurjen K. van Deen

Esta zona negra progresa hacia la parte inferior, precedida de un despliegue cinético de convección en las zonas que siguen aún coloreadas.

Jurjen K. van Deen, de La Haya, estudia también las películas de jabón. Se ha ocupado especialmente del modo en que se consigue formar pompas de jabón soplando en un anillo, vieja diversión infantil. Cuando la pompa huye del anillo, ¿por qué no la rompe el orificio que el aro le deja en el costado? Ese orificio debe cerrarse exactamente cuando la pompa se desprende; pero, ¿cómo?

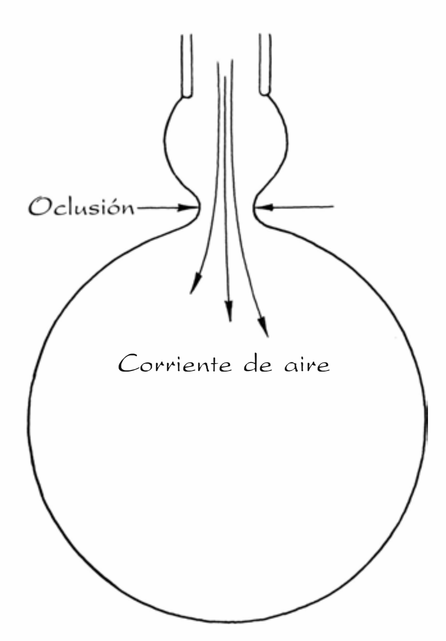
Para resolver el misterio, van Deen trató de fotografiar las pompas que un ayudante soplaba de un anillo. Se encontró con que, a menos que empleara una cámara ultrarrápida e inmovilizara cuidadosamente el anillo, las fotografías resultaban siempre borrosas y a destiempo. Tuvo así que construir un montaje muy firme. Se trata de un tubo montado en un soporte de laboratorio que hace de sifón para extraer la solución jabonosa de un depósito en alto. La velocidad de la corriente se regula con una pinza. Unido a ese tubo, hay un segundo por donde fluye aire. Este segundo tubo se prolonga hacia abajo, más allá del extremo del tubo de la solución. Cuando ésta abandona su tubo, se vacía sobre la abertura del tubo del aire, posición en la que forma una película.

El aire se alimenta con una botella de plástico de 25 litros, que la descarga de una aspiradora mantiene a presión. Otra pinza regula la corriente de aire por el tubo. Como indicador de la presión del aire, se emplean un tubo en forma de U lleno de agua. Todas las conexiones con la botella se efectúan mediante una pieza, especialmente ideada por van Deen, que se adapta a la boca de la botella. La solución está constituida por detergente lavavajillas, disuelto en agua en una proporción de 1 a 5, o de 1 a 10, con un chorrito de glicerina y una cucharadita de azúcar. Las fotografías se toman bajo luz estroboscópica, para limitar el tiempo de iluminación (de 30 a 50 milisegundos). Las fotografías resultan borrosas si se opta por períodos de iluminación más largos.

Después de que la solución cubre el extremo del tubo del aire, formando una película, ésta se infla y crea una burbuja con la ayuda de la corriente de aire. La burbuja crece poco a poco, hasta que su peso vence a la tensión superficial que la mantiene adherida al tubo y se desprende. La corriente de aire comienza entonces a inflar otra burbuja. Se forman así pompas en procesión regular, por lo que la cámara y el flash deben dispararse con gran precisión. Van Deen controla la velocidad de crecimiento de las pompas ajustando la corriente de aire; y el tamaño de cada burbuja puede establecerlo ajustando la corriente de solución.

El dispositivo le permitió averiguar cómo logra una burbuja sobrevivir a su lanzamiento. Mientras se desarrolla, la pompa se mantiene unida al tubo mediante un cordón umbilical, inicialmente cilíndrico, que se va estrechando conforme aumenta el peso de la burbuja. En el momento exacto en que el cuello del estrechamiento se ocluye sobre sí mismo, se desprende la pompa; así es como se cierra el orificio. La tensión superficial tira del resto del cordón umbilical devolviéndolo al tubo, donde forma otra película dispuesta para crear la burbuja siguiente. No cabe duda de que ocurren hechos similares cuando un niño sopla pompas en un anillo.

Si en el experimento de van Deen el caudal de aire se eleva, puede expulsar la burbuja antes de que ésta haya tenido tiempo de formarse. Por ello, la apoya en un anillo. Con este dispositivo, las fotografías revelan que el cordón umbilical desarrolla a veces varios cuellos en toda su longitud, antes de ocluirse. Tiene razón cuando sugiere que el estudio de la dinámica del cordón umbilical puede merecer la pena.



Cuello de una pompa

Un juguete nuevo y muy entretenido es el llamado Bubble Thing, fabricado por la empresa David Stein de Nueva York. Este mecanismo produce unas encantadoras pompas, de varios metros de longitud, con el aspecto de amebas. El record de longitud, no oficial, ronda los 15 metros.

El ingenio consiste en un tubo de plástico con un bucle de cinta estrecha de tela en un extremo. Un extremo del bucle está fijo al extremo del tubo y, el otro, unido a un cursor que se desliza a lo largo del tubo; el cursor se precisa para variar la anchura del bucle. De la parte inferior del bucle cuelga una pesa.

Siguiendo las instrucciones, mezclé una parte de detergente lavavajillas con 10 partes de agua y una cuarta parte de glicerina. Tras cerrar el bucle desplazando el cursor hasta el otro extremo del tubo, lo sumergí en la solución empapándolo a conciencia. Lo alcé de la solución y mantuve el tubo horizontal, mientras movía poco a poco el cursor para abrir el bucle y desplegar la película de jabón que se extiende sobre el mismo. Si es día en que no se mueve una hoja, hay que caminar hacia atrás para inflar la película. Si hay brisa, ésta se encargará de ello. La pompa crece, tendiéndose y alargándose desde el bucle, a medida que la tensión superficial va extrayendo líquido de la cinta de tela. Pero si el viento sopla, o se anda muy deprisa, la película revienta, dejando unos hilillos finos flotando en el aire o planeando hacia el suelo.

Los que tienen éxito ven formarse una pompa tubular de muchos metros que se debate como un animal salvaje. Para soltarla, hay que cerrar el bucle, con lo que se crea el cordón umbilical, que se estrecha y finalmente se ocluye sobre sí mismo. Si se espera demasiado, la pompa se desprende sin que se cierre el orificio del bucle, en cuyo caso se desintegra lentamente. Pero si la pompa se suelta correctamente, el orificio se cierra.

Cuando la pompa flota en el aire, la tensión superficial pugna por transformar el tubo en una esfera, haciendo que el área sea mínima. Esta acción se contrapone a la fuerza de la gravedad y a la falta de uniformidad en la distribución del líquido de la pompa. Se organiza así una danza de formas variables en la que la pompa puede estallar. Pero si sobrevive a esa batalla de fuerzas y al zarandeo de la brisa, y si no se desintegra al tocar algún cuerpo duro, marchará flotando por la calle, como un zeppelin. Durante todos esos movimientos, relucirá con delicados colores, siempre cambiantes.

Libros

Azar y determinismo, técnica medieval, cultura de la agresividad y sociobiología

Antonio Fernández-Rañada, Luis Alonso, Claudio Esteva y Jordi Sabater

PROCESO AL AZAR, dirigido por Jorge Wagensberg. Tusquets; Barcelona, 1986. Uno de los cambios más importantes que está sufriendo nuestro entendimiento del mundo en los últimos años es la comprobación de que la realidad es mucho más compleja de lo que se tendía a pensar y que la visión de la ciencia como exposición de la simplicidad y regularidad de la naturaleza es sólo válida para una primera aproximación. Esta revisión debe ser bienvenida, pues la concepción del mundo a que llevaba la física clásica era demasiado esquemática, simple y fría. Y en el centro de este cambio está el papel que desempeña o debe desempeñar el determinismo en la descripción del mundo físico.

La historia es ya bastante conocida. Se puede decir que empezó hace 100 años, cuando Bruns mostró que los métodos tradicionales de la mecánica de Newton son inaplicables al problema de los tres cuerpos. Poco después, Poincaré, estudiando el mismo sistema en sus trabajos de mecánica celeste, descubrió la tremenda complejidad que escondían sus aparentemente simples ecuaciones y que pertenece también al sistema dinámico genérico. Tras ello era imposible mantener la visión laplaciana del mundo, con su famosa inteligencia conocedora de todo el pasado y de todo el futuro. Pero las cosas no estaban maduras para comprender a fondo los resultados de Poincaré. La nueva teoría cuántica absorbía los esfuerzos de los físicos más brillantes y relegó el problema durante muchos años, como si fuera una simple cuestión técnica, sólo relevante en casos muy especiales, casi patológicos. Pero tras el descubrimiento del teorema de Kolmogorov en 1954 y del atractor de Lorenz en 1963, la urgencia de hallar una síntesis entre las tradiciones determinista y probabilista emerge con claridad. Para ello es necesario examinar de nuevo muchos conceptos básicos, no sólo en las grandes teorías, sino incluso en los libros de texto elementales.

Una de las consecuencias es la necesidad de revisar la idea del tiempo, dando un sentido propio a lo irreversible. Pues se puede decir que el concepto de tiempo de la física clásica es inadecuado para un mundo en el que hay cosas que nacen y mueren. Corresponde más bien a una realidad estática en el que las trayectorias existen por siempre, sin empezar ni acabar, y las cosas son eternamente las mismas. Hasta tal punto que Y. Prigogine habla, con frase certera, del redescubrimiento del tiempo por la ciencia moderna. Paradójicamente, la revelación del desorden está arrojando nueva luz sobre cómo se generan las estructuras ordenadas en el mundo inerte, lo que permite enfrentarse desde una perspectiva fructífera al nacimiento de las formas biológicas.

Para evaluar la situación y discutir las perspectivas, la facultad de física de la Universidad de Barcelona invitó a seis conocidos autores, científicos todos de muy gran prestigio, a un encuentro en el Teatro-Museo Dalí de Figueras, ante un auditorio científico-artístico-filosófico que siguió las exposiciones y participó en los debates. El libro recoge las seis conferencias invitadas, junto con los coloquios, uno tras cada charla y dos generales.

Empieza con un preámbulo de Salvador Dalí, quien, al seguir las discusiones, pudo oír varias referencias a sus cuadros que, para los oradores, representaron un papel análogo en el arte a la nueva valoración del desorden frente al orden en la ciencia.

Tras una introducción de Jorge Wagensberg, abre fuego P. T. Lansberg, alemán afincado en Inglaterra, hombre universal, autor de trabajos en campos tan diversos como electrónica, biología, cosmología o filosofía de la ciencia, analizando el papel de la incertidumbre en varias disciplinas. En matemáticas con el teorema de Gödel y la imposibilidad de construir sistemas formalizados consistentes y completos que incluyan a la aritmética. En las mecánicas, con la turbulencia y el caos en la clásica, el papel de la probabilidad en la estadística y en la cuántica, discutiendo sus diversas interpretaciones. De gran interés es la discusión que propone sobre la libertad y el determinismo. Concluye con la polémica afirmación de que los métodos de la ciencia no bastan para las cuestiones últimas como el origen del universo o la existencia de Dios.

G. Ludwig, especialmente conocido por su monumental *Fundamentos de la Mecánica Cuántica*, examina cómo el determinismo se adueñó de la física por una posición filosófica equivocada, contraria al método experimental propuesto por Galileo. Este creía que las matemáticas son apropiadas para describir la naturaleza y que ésta se manifiesta mediante experimentos. Pero rechazó la filosofía como método de la física que prescribe cómo debe ser ésta. Ludwig trata también de la libertad, afirmando que no existe ninguna contradicción entre ésta y las leyes de la física.

R. Thom, matemático francés, medalla Fields de matemáticas en 1968 y creador de la teoría de las catástrofes, emprende la defensa del determinismo, enfrentándose con la idea de moda que dice "que el mundo de las antiguas verdades de la ciencia clásica ha muerto, que el determinismo laplaciano ha vivido demasiado". Afirma la incompatibilidad entre ciencia y novedad radical y precisa técnicamente el sentido del determinismo. Concluye con la aseveración de que es posible restaurar el determinismo y que sus debilidades no son definitivas.

E. Schatzman, considerado el padre de la astrofísica francesa, examina el problema desde la perspectiva que ofrecen los últimos datos sobre el cosmos. Se confiesa manifiestamente determinista y defiende la filosofía natural determinista basada en las ideas de Epicuro y Lucrecio. Examina el modelo estándar del universo y, aunque señala tres problemas relacionados con la causalidad, la planitud y la rotura de la simetría bariónica, concluye que el cosmos es determinista.

El catalán R. Margalef, catedrático de la Universidad de Barcelona y premio Ramón y Cajal 1984, estudia el problema desde el punto de vista de la selección natural y de la ecología. Es muy atractiva su presentación de cómo a la energía disipada en un ecosistema le corresponde un aumento de la información, especialmente de cómo la información se produce sobre todo donde ya había más, lo que favorece la generación de formas y de estructuras.

Y. Prigogine, premio Nobel de Química en 1977, titula su charla "Enfrentándose con lo irracional", y en ella describe cómo el concepto de tiempo

de la física clásica es inadecuado, lo que condujo a considerar lo irreversible como una ilusión, idea que comparten, por ejemplo, Einstein, Bergson y Heidegger. Para él, la racionalidad ya no puede ser identificada con la certeza, ni la probabilidad con la ignorancia. Una nueva visión del tiempo, ligada a la existencia de lo irreversible, nos conduce a un universo mucho más rico, en el que se puede restablecer la antigua alianza rota de la naturaleza con el hombre.

Sin duda es un libro de enorme interés que se puede leer desde bagajes personales muy diversos y que tiene muchos niveles de significación. Interesa de modo inmediato a físicos, químicos y matemáticos, pero también a toda persona preocupada por entender a qué tipo de visión del mundo nos conducen los hallazgos recientes de la ciencia. Debe resaltarse que el encuentro se diseñó como explícitamente pluridisciplinar y que parece que consiguió su objetivo, como lo muestran las intervenciones en los debates de filósofos, médicos, artistas e intelectuales de todo tipo. (A. F.-R.)

MEDIEVAL RELIGION AND TECHNOLOGY, por Lynn White, Jr. University of California Press. Berkeley, 1986. Se recoge en este compendio 19 artículos publicados por White desde 1940 hasta 1975. Resume, pues, treinta y cinco años de actividad creadora de uno de los prohombres, sino la figura máxima, de la historia de la técnica medieval. Pero, ¿acaso hubo ciencia y técnica medieval? No sólo las hubo –y en qué medida–, sino que tomaron cuerpo a través de la expresión religiosa y de los presupuestos religiosos (p. IX).

Cuenta, zumbón, que, mediada la década de los veinte, en sus años de formación universitaria, aprendió dos apotegmas incontrovertibles: primero, que no había ciencia medieval y, segundo, que la Iglesia persiguió a Roger Bacon por pretender dedicarse a su cultivo. Uno y otro prejuicio cayeron en Norteamérica con los trabajos de Charles H. Haskins y sus discípulos y los realizados por White y su escuela, entre otros. Sólo desde la ignorancia pueden ya repetirse semejantes simplezas. Y hoy son fecundísimos los institutos de Madison, Washington, Stanford, Kansas, Toronto y Montreal, que, en Norteamérica, van aportando día a día nueva luz sobre investigaciones ópticas, botánicas, geométricas, mecánicas, hidráulicas, etc. de los "tiempos oscuros de la superstición". En comparación, dejemos de lado la medicina y la astronomía, diríase que, en España e Hispanoamérica, el conocimiento de la técnica y ciencia medievales sí se halla sumido, por nuestra incuria, en la más tenebrosa de las tinieblas.

Tras una introducción general, que bien pudiera valer de ensayo recapitulador de la historiografía del tema, aparece un primer artículo programático sobre técnica e invención en la Edad Media. En él se esbozan los tres campos principales de innovación técnica: el estribo y su importancia en la lucha a caballo, el arado pesado y la revolución agrícola y el diseño de máquinas para el mejor aprovechamiento de las fuentes de energía. Artículos de alcance general son también el segundo (Ciencia natural y arte naturalista en la Edad Media), el quinto (Raíces medievales de la ciencia y técnica modernas) y el diecinueve (Ingeniería medieval y sociología del conocimiento).

La influencia mutua de Oriente y Occidente se aborda en el capítulo tercero (Tibet, India y Malaya, fuentes de la técnica medieval occidental); la dependencia medieval de Galileo, corroborada en un estudio de filigrana por William A. Wallace, la extiende White al campo de la técnica, mientras recrea las posibilidades de la misma en las primeras décadas del s. XVII (cap. 8). Entretenidos resultan los varios artículos consagrados a la aviación, el coche y el paracaídas; muy sugerentes, los relativos a ciertos autores más o menos ignorados ("Theophilus redivivus" y "Jacopo Aconcio, ingeniero").

White, que llegó a la historia de la ciencia y la técnica ganado por la lectura de la *Antropología* (1923) de Alfred L. Kroeber, no se detiene en la cabal descripción del instrumento o útil que le ocupa, sino que proyecta la asimilación social del mismo, cuando no es el tema principal abordado ("La vida de la mayoría silenciosa" y "La iconografía de la *Temperantia* y el carácter moralmente virtuoso de la técnica"). En esa onda se mueve también la explicación de por qué se dio un extraordinario desarrollo de la ciencia y la técnica en el Occidente católico y no en el Oriente ortodoxo (cap. 14).

El lector hallará un vivero riquísimo de información y fenómenos curiosos, por ejemplo, el papel de la astrología médica en el desarrollo de la mecánica (cap. 18), la trabazón del casco de las naves (cap. 15) y mil aspectos más; todo ello tejido con un dominio extraordinario de las fuentes –escritas, arqueológicas, arquitectónicas, pictóricas, numismáticas– y una manera de relatar vívida, desprovista de pedantería, antes bien salpicada con una buena dosis de finísimo humor. Hablando del aprecio al trabajo manual de judíos y monjes medievales, recalca: "Los rabinos ganaban su sustento con el trabajo de sus manos y enseñaban que el Dios del Sinaí había mandado a la humanidad, no sólo descansar el sábado, sino trabajar también los seis días restantes de la semana." (L. A.)

ESSAYS ON VIOLENCE, dirigido por J. Martín Ramírez, Robert A. Hinde y Jo. Groebel. Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 1987. Unos cincuenta científicos especializados en el estudio del problema de la guerra se reunieron en Sevilla, en mayo de 1986, con el fin de discutir asuntos relacionados con el cerebro y agresión. Lo hicieron auspiciados por la ONU e invitados por el Departamento de Psicobiología de la Universidad de Sevilla, así como por la Comisión Española de la UNESCO. Al término de dichas reuniones se redactó una declaración sobre la violencia y se reunieron algunos de los trabajos que pueden ser considerados representativos del espíritu del simposio.

Aparte de la "Declaración", y de un prefacio escrito por los directores de este libro, son ocho los artículos que se publican en el mismo. Cada uno de ellos viene a ser un complemento del otro, pues alternan entre la presentación de resultados empíricos y la reflexión sobre la epistemología del problema y el estado de la cuestión contemplado desde la perspectiva de los conocimientos actuales. Por lo tanto, y desde su especial ángulo de observación, cada autor expresa su particular referencia a lo que se sabe y a lo que se dice sobre la violencia, y sobre todo a lo que continúa siendo el núcleo discursivo del debate: ¿es innata la violencia a nuestra especie o en su caso la guerra, o son ambas, simplemente, un fenómeno de adquisición cultural producido desde instituciones sociales caracterizadas por la organización y la voluntad política de grupos de personas actuando de modo solidario?

En el caso de los autores que contribuyen a este libro, la coincidencia es absoluta en un sentido: la violencia y la guerra son asuntos de la cultura, no de los genes. Por esta razón, la guerra no es el resultado inevitable del desarrollo de un instinto, sino que es la forma que adquiere la violencia institucionalizada en diferentes sociedades de nuestra especie. En este sentido, la guerra no es un atributo de la naturaleza humana: es un modo ideológico de ser la cultura. Según eso, la guerra no es equivalente a una de las formas de la evolución humana, pues no está genéticamente ins-

talada en nuestra herencia. Dentro de estas conclusiones iniciales, se dice por los editores que, para producir instituciones que lleven a cabo los objetivos de una guerra, es indispensable crear la imagen de un enemigo, y con éste serán inherentes la organización social de dirigentes políticos, mandos militares y soldados nutridos por armamentos y por la solidaridad del esfuerzo común contra un determinado adversario.

Así, el hecho de que la guerra requiera la comunicación lingüística especializada, la coordinación organizada del uso de hombres y de armas, un proceso económico ciertamente productivo, enemigos estables durante un período de tiempo, de que habitualmente la practiquen individuos adultos, de que incluya como factores vinculantes el agonismo o comportamiento conflictivo entre grupos, y de que, en definitiva, sea un instrumento social para fines concretos, es determinante para entender que su estructura sirve a los objetivos de las sociedades que la instituyen como parte de su modo de relacionarse con otras.

Uno de los autores, Scott, señala que no existe analogía entre las luchas de los animales inferiores y las guerras entre seres humanos, y destaca en este aspecto que la guerra es una capacidad a la vez que una invención típicamente humana, aunque lo cierto es que sus causas son múltiples y polisistémicas. Esto significa: *1*) que no hay homologías que permitan comparar nuestros comportamientos en este sentido con los de las especies precedentes, *2*) que no puede hablarse de tendencias evolutivas que instalen genéticamente la guerra en nuestros organismos, *3*) que es un instrumento cultural y *4*) que del mismo modo que se han institucionalizado las guerras también puede institucionalizarse la paz.

El hecho de que los seres humanos son los que poseen mayor número de combinaciones genéticas, y el que sus particularidades diferenciales respecto de otros animales suponen formas múltiples de adaptación en el espacio y en el tiempo, inclina a pensar que si las causas aparecen como polisistémicas, también lo serán los medios a emplear para su eliminación institucionalizada.

Al señalar que toda guerra requiere la creación de la imagen de un enemigo, Wahlström añade que para ello es necesario producir primero sentimientos de hostilidad contra otro pueblo o grupo, pese a lo cual el problema continúa siendo el de hasta qué punto la imagen que se ha elaborado de un enemigo equivale a la verdad sobre este enemigo. De hecho, la cuestión reside en que el enemigo debe ser convertido en una amenaza para nuestras vidas, tanto como para nuestra seguridad vital. En tal extremo, para la creación de una imagen que permita acometer a un determinado enemigo con cierta decisión, es indispensable regirse por el más puro pragmatismo, pues de lo contrario, y a falta de una consciencia ciertamente crítica fundada en la idea de que el futuro y las convicciones son formas históricas, modificables, será improbable que otro grupo humano se transforme sin más en la imagen de un indeseable ético.

Es obvio que para conseguir fundar una imagen estable de enemigo son indispensables la propaganda y los medios de comunicación de masas, y que éstos tiendan a confirmar la imagen. Sólo de esta manera podrá legitimarse la violencia contra un enemigo al que, previamente, habrá que desposeer de humanidad. Esta legitimación es relativamente fácil cuando se aprovechan los estados emocionales de una población que, en estos casos, necesita proyectarse y externalizarse. En estas condiciones, un enemigo es siempre un chivo expiatorio al que se atribuye la culpabilidad de los males de una determinada población.

A este respecto, Ginsburg aclara que la violencia es siempre un acto aprendido, y no debemos confundirla con aquella agresividad que supone la lucha por sobrevivir y para alimentarse que encontramos en todas las especies, que, como señala, matan para comer. En estos términos, no hay que atribuir el dominio de un grupo sobre otro a la obtención de una mayor excelencia evolutiva o genéticamente programada para la violencia, pues, para el caso, lo desmiente la misma versatilidad humana. Por eso, es dudoso que haya existido guerra intraespecífica generalizada entre los primeros homínidos. Y, en cualquier caso, la violencia hay que entenderla como un desarrollo cultural más que como una predisposición biológica.

Desde este supuesto, el relativismo cultural viene a ser la mejor explicación del fenómeno de la violencia y, como indica Genovés, las extrapolaciones que incluyen a hombres y animales en procesos para los que se pretende igual determinación para la violencia, son contrarias a los enfoques cuyo rigor heurístico se basa en la identidad de los procesos y de los contenidos. De hecho, el que los animales sean predatorios por naturaleza no es equivalente a que estén institucionalizados para la guerra.

A este propósito, cabe hablar de tipos de violencia. Caballero los distingue al referirse a formas de agresión diferenciadas por: *a*) la intención de causar daño físico, *b*) la que resulta de los perjuicios económicos o morales conscientemente causados por un grupo a otro y que derivan del ejercicio de la competencia, *c*) los relacionados con el intercambio personal o con el de grupo, y *d*) los que oponen la legitimidad a la ilegitimidad y que, en este caso, asumen componentes éticos de difícil indiscutibilidad. Lo cierto es que mientras en el psicoanálisis, y a través del llamado instinto de muerte, éste se convierte en una función innata, en la sociología el proceso de agredir tiene sus fuentes en la dicotomía socialización/frustración, en la cual, cuando el control social es excesivo, la explosión agresiva resulta casi inevitable.

Goldstein, por ejemplo, destaca que la agresión pertenece al reino del relativismo histórico, y por esta razón forma parte de los tópicos, entre los cuales, y en muchos casos, su expresión es saludable para la estabilidad psíquica del organismo, en tanto supone una descarga de tensiones que contribuye a disminuir la ansiedad. En este supuesto, destaca que, biológicamente, los machos suelen ser más agresivos que las hembras, mas para el caso lo importante es que la única especie que puede ejercer la violencia por causas ideológicas es la nuestra. Y también será importante reconocer con Lorenz que mientras estamos dotados para ser agresivos, también lo estamos para inhibir la violencia.

Conforme a eso, Adams/Bosch señalan que la ideología y la cólera, en tanto son ingredientes de la agresión, influyen sobre esta actividad, con lo cual la idea de que la agresión pertenece al reino de los instintos es un mito. Cabalmente, entonces, la responsabilidad de los procesos agresivos corresponde a las identificaciones resultantes de los sistemas de socialización. A partir de este supuesto, para estos autores conviene más subrayar la influencia de la educación que la del instinto, de manera que más que estudiar la guerra como un fenómeno biológico, hay que entenderla como un sistema sociocultural.

Esta conclusión la suscribe Ramírez cuando apunta que, paradójicamente, la paz puede ser el resultado de la violencia, como sería el ejemplo de la llamada Pax Romana. Las investigaciones que lleva a cabo el autor parecen demostrar la influencia decisiva del ambiente familiar en la formación de las orientaciones agresivas, y en este caso la perspectiva del problema hay que considerarla de manera transdiscipli-

nar, sin perder de vista el objetivo fundamental de que para conseguir una sociedad antiviolenta es indispensable que comencemos por nosotros mismos, esto es, cultivando nuestra paz interior.

El epílogo de este libro sobre la violencia es una declaración colectiva en la que se confirman los extremos antedichos; se afirma que la guerra no puede atribuirse a una cualidad genéticamente heredada, que por ser un fenómeno cultural no cabe hipostasiarlo a otras especies, que por esta razón no puede probarse la existencia de un programa genético de la guerra, pues, en este sentido los genes no especifican los comportamientos; en todo caso, sólo proporcionan capacidades, de manera que resulta incorrecto atribuir la guerra a una condición evolutiva o producto de una selección natural, y por ello también es necesario señalar que el cerebro no es violento en sí mismo. A partir de tales aseveraciones, las guerras son productos ideológicos dirigidos por instituciones. Así, las guerras son una responsabilidad de las culturas y de las sociedades que las emplean, no de los genes.

Producido desde la serenidad de los planteamientos relativistas, este libro cabe incluirlo en el contexto del grupo de científicos culturalistas para los que la violencia forma parte del mundo de la ideología más que de la biología, y, en este sentido, vale añadir que el discurso filosófico y la adaptación de los hallazgos empíricos a esta explicación cultural sería distinto, y desde luego discurriría por un marco más agrio, si las contribuciones hubiesen sido hechas por etólogos, pues en este caso las referencias empíricas tendrían un valor más salvaje. (C. E.)

PARENTING ACROSS THE LIFE SPAN; BIOSOCIAL DIMENSION, dirigido por Jane B. Lancaster, Jeanne Altmann, Alice S. Rossi, Lonnie R. Sherrod. Aldine de Gruyter; New York, 1987. El "Social Science Research Council's Committee on Biosocial Perspectives on Parent Behavior and Offspring Development" de los Estados Unidos es un comité interdisciplinar, fundado en 1980 y formado por un grupo de especialistas en el campo de la biología y en el de las ciencias sociales y de la conducta. Se ocupan del estudio del fenómeno social humano observado desde una perspectiva amplia y ponderada, que engloba los aspectos biológicos y conductuales. El comité publicó en 1986 su primer libro, basado en aspectos concretos de la conducta social inherentes a las primeras etapas de la vida, escolaridad incluida.

El objeto de esta reseña es el segundo libro que acaba de editar. Recoge la labor de 23 expertos en biología general, antropología, primatología, psicología, psiquiatría, psicobiología, gerontología, sociología e historia.

Los dos primeros editores, Jane B. Lancaster y Jeanne Altmann, son especialistas bien conocidos en el dominio de las ciencias sociales y de la primatología de campo en Africa.

El libro consta de una introducción y 15 capítulos divididos en cuatro grandes áreas temáticas: la primera, integrada en dos capítulos, se refiere al parentesco durante el decurso del ciclo vital; la segunda trata de las perspectivas biosociales y la inversión parental desde un enfoque biologista; la tercera engloba cuestiones relativas al proceso de cambio en las relaciones de parentesco desde una perspectiva histórica. Los últimos cinco capítulos se centran en la inversión parental en las sociedades modernas.

Considerando que la dimensión biológica es contemplada, todavía, con enorme recelo en los estudios inherentes a la socialización humana, opinamos que los cinco primeros capítulos del libro, si bien de un biologismo a nuestro entender discreto y cauto en los temas sociobiológicos –que denominan en el libro biosociales–, representan, no obstante, una cierta novedad y el interés evidente de iniciar una nueva sociología menos estrictamente humanista.

De esta primera serie de artículos destacaríamos el de J. Altmann sobre el cuidado parental en los primates, que si bien no aporta ninguna novedad a los especialistas, resume algunos aspectos, relevantes, sobre conducta intragrupal en primates no humanos que pueden interesar a los sociólogos abiertos a las nuevas tendencias. El trabajo de M. Lamb y otros sobre la perspectiva biosocial en la conducta paternal resulta original y aporta una revisión selectiva de lo que se sabe acerca de la conducta paternofilial.

Los psicólogos y los sociólogos han centrado los estudios de la conducta paterna en los humanos, básicamente en la reproducción, aprovisionamiento trófico y material y la protección, acotando sus investigaciones en las sociedades humanas occidentales industrializadas. Este capítulo, que intenta ser una crítica selectiva de esta cuestión desde un enfoque biologista, incluye a los pueblos de otros contextos culturales e inclusive la conducta paterna de algunos primates superiores. Se concluye afirmando que la sensibilidad de padres y madres por sus hijos es similar, no obstante y que los padres dedican menos tiempo a sus hijos que las madres; opinan que ello es debido simplemente a imperativos socioecológicos relacionados con la conducta parental.

Las dos últimas áreas, integradas en 10 capítulos, presentan un carácter más sociológico, si bien algunas son abiertamente sociobiológicas y evolucionistas, como es el caso de la colaboración de J. Lancaster y Ch. Lancaster referente a algunos aspectos de la evolución de la familia humana. Estos autores centran su interés en los conceptos de recursos como bienes sin límite en oposición a los recursos como bienes limitados; en definitiva, el esquema mental de los cazadores-recolectores del paleolítico con una baja tasa de natalidad en oposición al ideal de los agricultores-horticultores, para quienes la posesión de numerosos hijos supone una evidente ventaja económica y social. Esta dialéctica quedó plasmada en lo que se denomina revolución neolítica, que ha supuesto el impacto más permanente y decisivo en la formación y génesis de la familia humana tal como la entendemos actualmente.

El resto de los capítulos tratan de la inversión parental en el cuidado de los hijos, la importancia que tienen los "siblings" en la socialización de los niños en diversos pueblos no occidentales y, finalmente, la evolución histórica que ha experimentado la interacción entre padres e hijos en las sociedades occidentales.

La segunda y última de las dos áreas se mueve dentro de los parámetros de la sociología clásica, no aportando ninguna novedad; se trata de estudios convencionales sobre demografía comparada entre negros y blancos en los Estados Unidos, la capacidad cognitiva de los niños en función de la inversión parental, para concluir en los estudios sobre la relación entre padres e hijos en la vejez y la incidencia de los ancianos en los procesos de socialización familiar desde una perspectiva de continuidad intergeneracional.

Ya hemos indicado que se trata de introducir, con cautela, la dimensión psicobiológica y sociobiológica en el amplio marco de las ciencias sociales, una empresa larga y, hasta hace muy poco, difícil, especialmente en España. Estamos, pues, ante un libro interesante que, al representar un enfoque interdisciplinar, original dentro de la sociología, será de lectura muy útil a los estudiantes o personas interesadas en los campos de la sociología, psicología, demografía, antropología cultural, psiquiatría y otros campos fronterizos entre ciencia y humanidades. (J. S.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

STARS & STRIPES

OPTIMUM WINDWARD PERFORMANCE OF SAILING CRAFT. John S. Letcher, Jr., en *Journal of Hydronautics*, vol. 10, n.° 4, págs. 140-144; octubre, 1976.

COMEBACK: MY RACE FOR THE AMERICA'S CUP. Dennis Conner y Bruce Stannard. St. Martin's Press, 1987.

PERFORMANCE PREDICTIONS FOR *STARS & STRIPES*. James C. Oliver, John S. Letcher y Nils Salvesen en *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, vol. 95. En prensa.

COLISIONES ENTRE PROTONES CON ESPIN

POLARIZED SCATTERING DATA CHALLENGE QUANTUM CHROMODYNAMICS. Bertram M. Schwarzschild en *Physics Today*, vol. 38, n.° 8, págs. 17-20; agosto, 1985.

ENERGY DEPENDENCE OF SPIN EFFECTS IN $p\uparrow + p\uparrow \rightarrow p + p$. G. R. Court, D. G. Crabb, I. Gialas, F. Z. Khiari, A. D. Krisch, A. M. T. Lin, R. S. Raymond, R. R. Raylman, T. Roser, K. M. Terwilliger, K. A. Brown, L. G. Ratner, D. C. Peaslee, P. R. Cameron, J. R. O'Fallon, T. S. Bhatia, L. C. Northcliffe y M. Simonius en *Physical Review Letters*, vol. 57, n.° 5, págs. 507-510; 4 de agosto de 1986.

COLOUR THEORY IN A SPIN. Harry J. Lipkin en *Nature*, vol. 324, n.° 6092, págs. 14-16; 6 de noviembre de 1986.

LAS CAUSAS DEL SINDROME DE DOWN

OBSERVATIONS ON AN ETHNIC CLASSIFICATION OF IDIOTS. J. Langdon H. Down en *London Hospital Clinical Lectures and Reports*, vol. 3, págs. 259-262; 1866.

DOWN'S SYNDROME AS A MODEL DISEASE. Charles H. Scoggin y David Patterson en *Archives of Internal Medicine*, vol. 142, n.° 3, págs. 462-464; marzo, 1982.

DOWN'S SYNDROME AND ALZHEIMER'S DISEASE: A REVIEW. C. Oliver y A. J. Holland en *Psychological Medicine*, vol. 16, n.° 2, págs. 307-322; mayo, 1986.

LA TEORIA DE LA SELECCION CLONAL

CROONIAN LECTURE: ON IMMUNITY WITH SPECIAL REFERENCE TO CELL LIFE. Paul Ehrlich en *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 66, n.° 432, págs. 424-448; 24 de julio de 1900.

THE NATURAL-SELECTION THEORY OF ANTIBODY FORMATION. Niels K. Jerne en *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 41, n.° 11, págs. 849-857; noviembre, 1955.

A MODIFICATION OF JERNE'S THEORY OF ANTIBODY PRODUCTIONS USING THE CONCEPT OF CLONAL SELECTION. F. M. Burnet en *The Australian Journal of Science*, vol. 20, n.° 3, págs. 67-69; 21 de octubre de 1957.

THE ACCEPTANCE AND REJECTION OF IMMUNOLOGICAL CONCEPTS. David W. Talmage en *Annual Review of Immunology*, vol. 4, págs. 1-11; 1986.

TRANSISTORES DE ARSENIURO DE GALIO

ELECTRON DYNAMICS IN SHORT CHANNEL FIELD-EFFECT TRANSISTORS. Jacques G. Ruch en *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-19, n.° 5, págs. 652-654; mayo, 1972.

PHYSICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES. S. M. Sze. John Wiley & Sons, Inc., 1981.

MILLIMETER-WAVE GaAs FET'S PREPARED BY MBE. B. Kim, H. Q. Tserng y H. D. Shih en *IEEE Electron Device Letters*, vol. EDL-6, n.° 1, págs. 1-2; enero, 1985.

ULTRAFAST CHIPS AT THE GATE. Herb Brody en *High Technology*, vol. 6, n.° 3, págs. 28-35; marzo, 1986.

CAZA DE GACELAS EN LA SIRIA DE LA EDAD DE PIEDRA

JAWA: LOST CITY OF THE BLACK DESERT. S. W. Helms. Cornell University Press, 1981.

BLACK DESERT SURVEY, JORDAN. Alison Betts en *Levant: Journal of the British School of Archaeology in Jerusalem and the British Institute at Amman for Archaeology and History*, vol. 15, págs. 1-10, 1983; vol. 16, págs. 25-34, 1984; vol. 17, págs. 29-52, 1985.

CONTAMINACION ATMOSFERICA POR PARTICULAS

SMOKE, DUST AND HAZE. S. K. Friedlander. John Wiley & Sons, Inc., 1977.

AEROSOLS: ANTHROPOGENIC AND NATURAL, SOURCES AND TRANSPOT. En *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 338; 1980.

RECEPTOR MODELS. Glen E. Gordon en *Environmental Science & Technology*, vol. 14, n.° 7, págs. 792-800; julio, 1980.

CHARACTERIZATION OF THE AEROSOL IN THE GREAT SMOKY MOUNTAINS. Robert K. Stevens, Thomas G. Dzubay, Robert W. Shaw, Jr., William A. McClenny, Charles W. Lewis y William E. Wilson en *Environmental Science & Technology*, vol. 14, número 12, páginas 1491-1498; diciembre, 1980.

EVOLUCION DE LOS CROMOSOMAS *B*

SELFISH DNA: THE ULTIMATE PARASITE. L. E. Orgel y F. H. C. Crick en *Nature*, n.° 284, págs. 604-607; 1980.

THE *B* CROMOSOME SYSTEM OF *SCILLA AUTUMNALIS* (*LILIACEAE*): EFFECTS AT THE ISOZYME LEVEL. M. Ruiz Rejón, F. Posse y J. L. Oliver en *Chromosoma*, vol. 70, págs. 341-348; 1980.

B CHROMOSOMES. R. N. Jones and H. Rees Academic Press, 1982.

B-CHROMOSOMES AND E-I ISOZYME ACTIVITY IN MOSAIC BULBS OF *SCILLA AUTUMNALIS* (*LILICEAE*). J. L. Oliver, F. Posse, J. M. Martínez-Zapater, A. M. Enríquez y M. Ruiz Rejón en *Chromosoma*, vol. 85, págs. 399-403; 1982.

JUEGOS DE ORDENADOR

THE THEORY OF COMPUTER SCIENCE: A PROGRAMMING APPROACH. J. M. Brady. Chapman and Hall, Ltds., 1977.

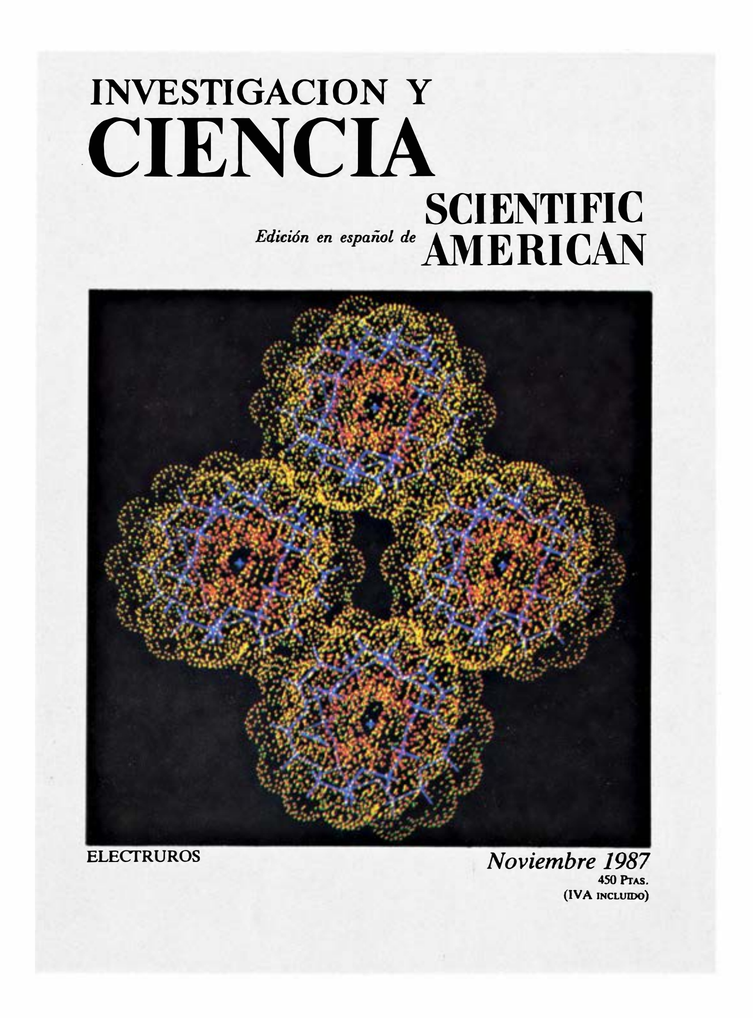
THE OFFICIAL SCRABBLE[R] PLAYERS DICTIONARY. Pocket Books, 1978.

THE OXFORD GUIDE TO WORD GAMES. Tony Augarde. Oxford University Press, 1984.

TALLER Y LABORATORIO

DYNAMIC PROCESSES IN SOAP FILMS. Karol J. Mysels en *Journal of General Physiology*, vol. 52, n.° 1, 2.ª parte, págs. 113s-124s; julio, 1968.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



EL PASILLO SWAHILI, por Mark Horton
En el siglo x, marinos Swahili de la costa oriental africana trazaron una ruta comercial por la que llegó a Europa oro, marfil y cuarzo. Su esfuerzo contribuyó al florecimiento de la Edad Media.

APRENDIZAJE INFANTIL DE LAS PALABRAS, por George A. Miller y Patricia M. Gildea
La clave reside en observar las palabras en contextos inteligibles. Los diccionarios suelen prestarse a interpretaciones erróneas, mientras que las imágenes interactivas de vídeo pueden movilizar la capacidad natural del niño a aprender del contexto.

DEFENSA ESTRATEGICA Y ARMAS DE ENERGIA DIRIGIDA, por C. Kumar N. Patel y Nicolaas Bloembergen
Los defensores y opositores de la iniciativa estadounidense de defensa estratégica invocan los hallazgos de un estudio de la Sociedad Americana de Física donde se evalúa la viabilidad de emplear láseres y armas de partículas como instrumentos de la defensa estratégica.

FLUJO GALACTICO DE GRAN ESCALA, por Alan Dressler
La velocidad y la dirección del movimiento propio de la Vía Láctea y de otras muchas galaxias indican que están atrapadas en los confines de un Gran Atractor, una lejana concentración de masa superior a la propuesta por cualquier teoría cosmológia.

TRANSCRIPCION INVERSA, por Harold Varmus
Cuando se descubrió la capacidad de transcribir el ARN a ADN, se consideró exclusiva de unos pocos virus oncogénicos. Hoy parece formar parte de la maquinaria genética de otros virus e incluso de los organismos superiores.

LA FIJACION BIOLOGICA DEL NITROGENO, por F. Castillo y J. Cárdenas
El interés de la fijación biológia del nitrógeno radica no sólo en las repercusiones económicas derivadas de su estudio, sino también en su carácter de sistema químico modelo de conversión, a temperaturas ambientales, de una especie molecular extremadamente inerte en una forma nitrogenada fácilmente incorporable en la biomasa.

ELECTRUROS, por James L. Dye
En esa nueva clase de materiales cristalinos, derivados del cesio, del potasio y de otros metales alcalinos, nubes de electrones que flotan libremente sostienen, enjaulada en moléculas neutras, una red de átomos positivos.

MIMETISMO VEGETAL, por Spencer C. H. Barrett
Flores que semejan insectos; malas hierbas que simulan cosechas; plantas que se confunden con piedras: en los vegetales, el mimetismo también es fruto de la selección natural.

